



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director
EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS

Firma del Jurado
MODESTO BARRIOS FONTALVO

Firma del Jurado
JAVIER MOUTHON BELLO

Cartagena de Indias D. T. y C. 12 de diciembre de 2017

DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, PARA UN SUELO ARENO-ARCILLOSO CONTAMINADO CON
GASOLINA



ARIEL ALEJANDRO AGUILAR VÉLEZ

CAROLINA FIGUEROA SUÁREZ

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T y C.

2017

DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, PARA UN SUELO ARENO-ARCILLOSO CONTAMINADO CON
GASOLINA.

ARIEL ALEJANDRO AGUILAR VÉLEZ

CAROLINA FIGUEROA SUÁREZ

Informe Final de Trabajo de Grado, para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

Edgar Eduardo Quiñones Bolaños, PhD. Ingeniería Ambiental Universidad de Guelph

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T y C.

2017

Gracias a Dios primeramente.

A nuestros padres por su incondicional apoyo,
al ingeniero Edgar Quiñones por ser nuestro guía y
a todas las personas que hicieron directa o indirectamente
parte de este proceso.

CONTENIDO

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. MARCO REFERENCIAL.....	15
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	15
2.2 ANTECEDENTES.....	18
2.3 MARCO TEÓRICO.....	23
2.3.1 Sistemas de clasificación de suelos.....	23
2.3.2 Mecánica de suelos.....	23
2.3.2.1 Compactación de suelos.....	24
2.3.2.2 Resistencia al cortante.....	25
2.3.2.4 Consolidación.....	28
2.3.3 La Gasolina como contaminante.....	29
2.3.4 Contaminación de suelo y procesos de remediación.....	31
2.3.5 Estabilización de suelos.....	35
3. OBJETIVOS.....	38
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
4. ALCANCE.....	39
5. METODOLOGÍA.....	42
5.1 CARACTERIZAR DEL SUELO Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE RIGEN LA MECÁNICA DE SUELOS.....	44
5.2. RELACIÓN ENTRE VARIABLES ESTUDIADAS.....	51

5.3 IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE ESTABILIZACIÓN, USANDO LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTABILIZANTES (CAL, CEMENTO Y ASFALTO).....	52
5.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	55
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	58
6.2 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS VARIABLES.....	60
6.2.1 Resultados de ensayo de Proctor Modificado.....	60
6.2.2 Resultados de ensayos de CBR.....	62
6.2.3 Resultados de ensayo de Corte Directo.	71
6.2.4 Resultados de ensayo de Consolidación	79
6.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA DE ESTABILIZACIÓN.	88
7. CONCLUSIONES	100
8. RECOMENDACIONES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
GLOSARIO	118
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procesos naturales que influyen en el destino de sustancias en el suelo.....	33
Tabla 2. Descripción de alguna técnica de tratamiento innovador.	35
Tabla 3. Métodos de estabilización para distintos tipos de suelo.	36
Tabla 4. Contenido de Asfalto para estabilizar.	37
Tabla 5. Cantidad de ensayos a realizados para la Etapa 1.	40
Tabla 6. Número de puntos obtenidos para cada parámetro.	52
Tabla 7. Cantidad de ensayos a que se hicieron durante la investigación por etapas.	54
Tabla 8. Variables que intervienen en el estudio.	54
Tabla 9. Resultados de Granulometría, para el segundo material evaluado.	58
Tabla 10. Característica del material para cada uno de los métodos usados.....	59
Tabla 11. Datos para el cálculo de la densidad del material.	59
Tabla 12. Resumen de los valores para cada parámetro mecánico que define las muestras ensayadas.	60
Tabla 13. Desviaciones calculadas con respecto a los valores de la muestra sin contaminar.	62
Tabla 14. Desviaciones calculadas con respecto a los valores de la muestra sin contaminar.	67
Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de corte directo.	77
Tabla 16. Consideraciones para preparación de las muestras a ensayar.	79
Tabla 17. Presiones calculadas para el ensayo de consolidación en laboratorio.	80
Tabla 18. Gravedades específicas de cada uno de los especímenes utilizados en este estudio. (Los datos y cálculos relacionados con esta tabla se presentan en los anexos).	80
Tabla 19. Resumen de desviaciones calculadas y promedio de desviaciones obtenido.	87
Tabla 20. Porcentaje de cemento por volumen.	89
Tabla 21. Resumen de desviaciones calculadas y promedio de desviaciones obtenido.	92
Tabla 22. Estabilizante más favorable para cada propiedad mecánica.	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de susceptibilidad de contaminación de suelos en la ciudad de Cartagena.	22
Figura 2. Peso específico vs contenido de humedad.....	24
Figura 3. Ubicación del Campus Piedra de Bolívar.....	39
Figura 4. Esquema Metodológico de la investigación.	43
Figura 5. Algunos ensayos correspondientes a la caracterización del material.	45
Figura 6. Material extraído para la realización de los ensayos (Primera extracción).	45
Figura 7. Punto de extracción del material utilizado en el estudio. Descapote de 30 cm.	46
Figura 8. Registro fotográfico de ensayos realizados.	48
Figura 9. Ensayo de CBR, en la imagen el pistón penetra una muestra contaminada con 5% de gasolina.	49
Figura 10. Banco de Consolidación de los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cartagena. En la imagen se ensayan con 16 kg muestras contaminadas con 3%, 5% y 10% de izquierda a derecha.....	50
Figura 11. Relación entre la densidad de compactación y la proporción de gasolina.	60
Figura 12. Relación entre la humedad óptima y la proporción de gasolina.	61
Figura 13. Relación entre la relación de soporte del suelo (CBR) y la proporción de gasolina.	63
Figura 14. Porcentaje de contaminante vs CBR.	65
Figura 15. Contenido de contaminante vs CBR.....	66
Figura 16. Densidad seca vs porcentaje de CBR para cada porcentaje de gasolina.	68
Figura 17. Gráfica representativa del ensayo de CBR, Presión de Penetración vs Deformación para cada número de golpes.	70
Figura 18. Esfuerzo Cortante vs Esfuerzo Normal. Determinación del ángulo de fricción y la cohesión del suelo para cada porcentaje de gasolina.....	72
Figura 19. Relación entre el ángulo de fricción y la proporción de gasolina.....	74
Figura 20. Relación entre la cohesión y la proporción de gasolina.	75
Figura 21. Relación entre el ángulo de fricción y la proporción de gasolina.....	77

Figura 22. Relación entre la cohesión y la proporción de gasolina.	78
Figura 23. Valores de C_c vs Porcentaje de gasolina.	81
Figura 24. Relación obtenida entre proporción de vacíos y proporción de gasolina.	83
Figura 25. Relación obtenida entre C_v 50 (kg/cm^2) y proporción de gasolina.	84
Figura 26. Velocidad de consolidación C_v 90 (cm^2/seg) vs presión.....	86
Figura 27. Relación obtenida entre presión de preconsolidación y proporción de gasolina.	87
Figura 28. Índice de compresibilidad vs estabilizante.	95
Figura 29. Relación de vacíos vs estabilizante.....	95
Figura 30. C_v 50 vs estabilizante.	96
Figura 31. C_v 90 vs estabilizante.	97
Figura 32. Presión de preconsolidación vs estabilizante.....	98

RESUMEN

Dentro de los materiales de construcción, el suelo representa una particular importancia para el ingeniero civil, pues sobre él es donde se soportan las cimentaciones y la superestructura. El suelo es considerado como un recurso no renovable, por esta razón este estudio buscó establecer si es posible utilizar suelos contaminados con gasolina en procesos constructivos. Esta investigación constó de dos etapas; el objeto principal de esta investigación en su primera etapa fue caracterizar mecánicamente muestras de suelo contaminadas a distintas concentraciones de gasolina. Para esto, primero se realizaron ensayos de granulometría y límites de Atterberg, para luego aplicar los métodos de AASHTO y SUCS para clasificar suelos. Una vez establecido el tipo de suelo como areno-arcilloso, se procedió a realizar la caracterización mecánica de la muestra patrón (sin contaminar) esto con el fin de obtener parámetros de comparación; para esto se aplicaron los ensayos requeridos (Proctor, CBR, corte directo, consolidación), descritos en el marco teórico de esta investigación. Posteriormente se contaminaron metódicamente muestras de suelo al 3, 5, 10 y 12%, las cuales fueron sometidas a los mismos ensayos ya mencionados. De acuerdo con los resultados obtenidos en la primera etapa, se pudo establecer que la presencia del contaminante en el suelo favorece algunas propiedades, mientras que contribuye al detrimento de otras. La propiedad mecánica del suelo que se vio afectada en mayor grado fue CBR, puesto que, con cada uno de los porcentajes, el cambio en comparación con la muestra patrón supero el 100%, esta fue una las propiedades que mejoró con la presencia del contaminante.

La muestra más crítica (12% de gasolina) fue sometida a procesos de estabilización con cal, cemento y asfalto, contrario a lo esperado, para la mayoría de los parámetros analizados la presencia del estabilizante no significó un aumento o mejoramiento del parámetro. Sin embargo, de los tres estabilizantes estudiados, el cemento fue el que mejor comportamiento mostró, arrojando mejores valores en parámetros como cohesión y ángulo de fricción que determinan la resistencia cortante del suelo.

PALABRAS CLAVES: Estabilización, Suelos contaminados, Propiedades mecánicas.

ABSTRACT

Within the materials of the construction, the soil represents of particular importance for the civil engineer, because on the one where the foundations and the superstructure are supported. The soil is considered as a non-renewable resource, for this reason this study sought to establish if it is possible to use soils contaminated with gasoline in construction processes. This investigation consisted of two stages; the main object of this investigation in its first stage was mechanically characterized contaminated soil samples at different concentrations. For this, first tests of granulometry and limits of Atterberg were realized, soon to apply the methods of AASHTO and SUCS to classify soils. Once the soil type was established as clay-sand, the mechanical characterization of the standard sample (without contamination) was carried out in order to obtain comparison parameters; for this the required tests (Proctor, CBR, direct cutting test, consolidation), described in the theoretical framework of this investigation, were applied. Subsequently soil samples were methodically contaminated at 3, 5, 10 and 12%, which were subjected to the same tests already mentioned. According to the results obtained in the first stage, it was possible to establish that the presence of the contaminant in the soil favors some properties, while it contributes to the detriment of others, for percentages below 10%. The mechanical property of the soil that was affected largely was CBR, since, with each of the percentages, the change compared to the standard sample exceeded 100%, and this was one of the properties that improved with the presence of the contaminant.

The most critical sample (12% gasoline) was subjected to stabilization processes with lime, cement and asphalt, contrary to what was expected, for most of the analyzed parameters, the presence of the stabilizer did not mean an increase or improvement of the parameter. However, of the three stabilizers studied, the cement showed the best performance, showing better values in parameters such as cohesion and angle of friction that determine the shear strength of the soil.

KEYWORDS: Stabilization, Soils pollution, Mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los materiales de construcción, el suelo representa una particular importancia para el ingeniero civil. Todo lo que aquel ejecuta debe estar firmemente anclado en un estrato de suelo que logre absorber las cargas sin presentar asentamientos excesivos, como la afirma el ingeniero y Docente de la Universidad de Cartagena, José España Morato. La literatura coincide que de los materiales de construcción, el suelo es el más complejo, esto debido a la cantidad de variables que determinan sus condiciones y los diferentes factores que en conjunto influyen dichas variables (Wicander & Monroe, 2000). Dentro de estos, están los factores climáticos, las cargas aplicadas y uno muy importante que está relacionado con la acción directa o indirecta de los seres humanos sobre las condiciones de un suelo. Al igual que todos los sistemas presentes en la tierra, un agente extraño en el suelo puede causar grandes impactos en el equilibrio o condiciones normales. Estos agentes contaminantes pueden provenir de distintas fuentes, y poseer características químicas particulares.

Las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se conocen como usos del suelo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2000). Los procesos de desarrollo antrópico son en gran parte los que definen los diferentes usos del suelo (Torres, 1998). Los complejos e importantes procesos industriales que sostienen las economías producen diferentes impactos, de los cuales, algunos pueden ser calificados como positivos y otros negativos; sin duda los efectos negativos son más palpables cuando se observan desde la óptica medio ambiental (Gómez, 2010). Los ecosistemas circundantes a las zonas industriales y de tratamiento, almacenamiento y transporte de sustancias nocivas, son los primeros en resultar afectados, dado que reciben, de primera mano, todos los residuos vertidos, tanto a la atmósfera, como los depositados en el suelo y en las fuentes de agua; e incluso no siempre estos vertidos necesariamente se tratan de residuos, sino que, muy a pesar de los controles existentes en el manejo de este tipo de sustancias, los escapes accidentales pueden causar impactos en el medioambiente circundante. Por otro lado, para la industria de la construcción, la condición de contaminación de suelo y sus consecuencias, se traduce en una desvalorización del mismo.

Lo anterior permite plantear la hipótesis que, dado un proceso de contaminación por el desarrollo de alguna de las actividades potencialmente contaminantes (Ambiente & Instituto Geológico y Minero de España, 2007), se podrían utilizar los mismos en procesos constructivos, teniendo conocimiento de la influencia del contaminante sobre las propiedades mecánicas y portante de los suelos. Si se determina entonces, la influencia del contaminante en las propiedades mecánicas del suelo, se podrá dar respuesta al siguiente interrogante, ¿Qué proceso de estabilización es el adecuado para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo areno-arcillosos que ha sido contaminado con gasolina?

Este trabajo de investigación fue realizado en los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, Colombia; y está enmarcado, dentro de la línea de investigación Contaminación Ambiental del Grupo de Investigación y Modelación Ambiental (GIMA) de esta misma *alma mater*; debido a que los resultados dependieron de los ensayos realizados a diferentes muestras de suelo previamente seleccionado y contaminado con un hidrocarburo (gasolina). Se buscó determinar cuantitativamente el impacto que produce un agente extraño en particular, gasolina, en aquellas propiedades del suelo que tienen importancia para el ingeniero civil, con el propósito de determinar si estos suelos contaminados pueden ser reutilizados a pesar de su condición de contaminación.

La revisión bibliográfica, permitió establecer que se han realizado varios estudios relacionados con temáticas afines a la de este trabajo, a nivel nacional por ejemplo se realizó un estudio en el departamento de Santander, que permitió la caracterización mecánica de suelos arcillosos afectados por derrames superficiales de hidrocarburos. Se evidenció que, los suelos arcillosos contaminados con diferentes concentraciones de petróleo, poseen una tendencia a la disminución de la humedad óptima a los 15 y los 55 días posteriores a la contaminación; de igual manera el ángulo de fricción mostró un incremento a medida que se aumentaron las concentraciones. Adicionalmente, los resultados mostraron que la presencia del contaminante afecta los valores de coeficiente de consolidación C_v pero que, al comparar estos valores con la muestra sin contaminar, estos no siguieron un patrón específico.

Para la ciudad de Cartagena, a través de estudios de casos puntuales se han establecido condiciones particulares de los procesos de contaminación de este tipo de sustancias, tales como el presentado en el barrio San Pedro donde se encontraron infiltraciones de hidrocarburo procedentes de una estación de gasolina cercana al lugar. En 2013 mediante un estudio realizado para 32 estaciones de servicio en la ciudad, se elaboró un diagnóstico de los suelos contaminados y/o susceptibles a contaminación; se determinó que del total de zonas evaluadas el 62,5% presentaron un alto riesgo, con potenciales de contaminación altos. Gracias a la alta capacidad migratoria de contaminantes como la gasolina, se modificaron las estructuras de los suelos evaluados, debido a la ruptura de los agregados; según el estudio las partículas más pequeñas aportan mayor área superficial para la absorción de los productos contaminantes.

Además, referente a casos de bioremediación en Cartagena se pudo establecer que el factor que tenía mayor influencia en la rapidez de un proceso de degradación era la cantidad de microorganismos utilizados en el proceso; obteniendo resultados satisfactorios a los diez meses, tan solo con una población autóctona de 1×10^5 mg/g.

Como existen diferentes tipos de suelos, con distintos comportamientos mecánicos, la variable suelo debió ser delimitada. Para el estudio se tomaron muestras de suelo Arenoso-Arcilloso en los terrenos de la Sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena (Colombia), las cuales se dividieron en dos tipos, suelo sin contaminar y suelo contaminado; este último se contaminó de forma controlada en laboratorio con diferentes concentraciones de gasolina. Los ensayos se realizaron de acuerdo con los estándares y condiciones de pruebas establecidas tanto por normas nacionales como internacionales, para garantizar su validez y la representatividad de los resultados. Los resultados obtenidos de los ensayos geotécnicos, tanto para muestras no contaminadas como las contaminadas, y su posterior comparación cuantitativa, permitieron establecer porcentualmente el impacto que tiene el contaminante en el suelo desde la óptica de la ingeniería civil, para posteriormente plantear alternativas de estabilización, con el fin de reutilizar dichos suelos para fines constructivos. Lo anterior justifica la realización de este estudio, teniendo en cuenta además que podrá ser

tomado como base para la evaluación de casos puntuales de contaminación con gasolina o estudios afines.

Ahora bien, ¿Por qué es relevante este tema? El hecho de que los suelos son recursos no renovables hace que el encontrar alternativas de reutilización, se traduzca en beneficios económicos y ambientales. Ambientalmente, el establecer la influencia de este contaminante en las propiedades de los suelos permitirá determinar que procedimientos serán los apropiados para la recuperación y estabilización de dichos suelos, ayudando a que no sean inutilizables. Desde el punto de vista económico se debe mencionar que la reutilización de suelos contaminados como material apto para la construcción después de un proceso de estabilización, permitirá la recuperación en valor económico de los predios inicialmente afectados por contaminación. Además, la realización de este estudio aportó un beneficio desde el punto de vista técnico y metodológico, esto es, el conocimiento del comportamiento mecánico de un suelo bajo la acción de uno de los contaminantes más comunes, la gasolina y el método de estabilización más adecuado para su reutilización.

En la primera etapa, de las dos que comprende la investigación, los efectos de dicha contaminación fueron importantes y requirieron ser cualificados y cuantificados. En ella se determinó cual fue la influencia sobre las propiedades mecánicas, de resistencia y de soporte de dicho suelo, al estar expuesto a la contaminación con hidrocarburo en estado líquidos (gasolina); para lo cual se realizó una caracterización de las muestras, evaluando para cada una de ellas las mismas propiedades; de acuerdo con las normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), las normas NTC para el ensayo de suelos y las normativas internacionales que fueron necesarias. La culminación de la caracterización de los suelos, mediante la comparación con la muestra patrón (sin contaminar); permitió poner en marcha la segunda etapa, que contempló el estudio de métodos de estabilización para el suelo analizado, determinando en qué casos un suelo contaminado superficialmente con gasolina al ser estabilizado puede ser usado para la construcción.

2. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se desarrolla el estado del arte, que comprende los aspectos más relevantes de las investigaciones realizadas, y que guardan relación con la temática a desarrollar. De igual manera, se presenta la base teórica en que se fundamenta esta investigación.

2.1 ESTADO DEL ARTE

En cuanto al estado del arte, se puede decir que existen amplios estudios sobre la temática de suelos contaminados con residuos industriales, hidrocarburos como contaminantes de suelos, métodos para la biorremediación de suelos, entre otras temáticas afines.

Desde hace ya varios años se han venido desarrollando investigaciones que tienen como propósito la intervención de suelos contaminados con hidrocarburos, con dos propósitos muy diferenciados; debido a que la temática está estrechamente relacionada con el tema de contaminación ambiental, uno de los propósitos ha sido la remediación de dichos suelos, esto tanto en el ámbito local como internacional. Por otro lado, el segundo propósito ha estado encaminado a la reutilización de los mismos.

La biorremediación ha sido un campo ampliamente explorado; *Li, Wang & Ren (2015)* concluyeron que materiales como arena favorecían los resultados en los procesos de remediación y que la proporción de la misma resultaba un factor determinante en la efectividad, además en otro estudio realizado, es claro como la resistencia del suelo se ve afectada por la presencia de hidrocarburos, debido a que después de haber sometido el suelo a procesos de remediación con aglutinante, agua, Cd, Cu, Pb, Ni y Zn la resistencia fue tan solo de 500 kPa (Reginald B. Kogbara, 2013). Por otro lado, *Tanga, Lub & Suna (2012)* muestran que, además de la resistencia del suelo, otra característica que varía durante los procesos de contaminación y posterior biorremediación es el pH, cuya tendencia es al aumento.

Como se mencionó anteriormente, dentro del estado del arte se hallaron investigaciones que contemplan la reutilización de los suelos contaminados, en 2006 *Hago, Hassan & Rawas*, estudiaron el comportamiento de bloques de hormigón y columnas de mampostería fabricados con arena mal graduada (SP) contaminada con petróleo y con un contenido del 6.8% de aceite; para el caso en particular se encontró que las concentraciones de petróleo no fueron tóxicas. En cuanto al comportamiento mecánico del bloque y de la mampostería se concluyó que al aumentar las concentraciones del contaminante la densidad del bloque aumentó, pero su resistencia se vio reducida de manera significativa (siendo las concentraciones críticas entre un 70% y un 80%), obteniendo valores inferiores a los especificados por la normativa de Omán. Finalmente se concluyó que la conductividad térmica no se ve muy afectada con el aumento en las concentraciones de contaminante.

En otro estudio realizado por los mismos autores en el año 2005, se presentaron los resultados sobre el uso potencial de los suelos contaminados con petróleo (PCS) en aplicaciones de construcción, incluyendo la estabilización con cemento, mezclado con agregado de piedra triturada para su uso en bases de carreteras o sub-bases. En este estudio se indicó un buen potencial para el uso de suelos contaminados en la construcción, puesto que la resistencia no confinada de las muestras al estabilizarlas con un 5% de cemento aumentó. Es importante resaltar que en el estudio se encontraron algunos efectos adversos; la hidratación del cemento por ejemplo se vio afectada por la condición de contaminación del suelo y además se encontraron reducciones en los valores de CBR; muy a pesar de lo anterior los autores recomiendan la utilización de estas mezclas hasta un 10% de PCS en base de carretera, mientras que mayores porcentajes de PCS pueden ser usados para sub-base en carreteras.

Uno de los estudios que se consideró de gran importancia no solo por los resultados sino que además sirvió de guía para el desarrollo metodológico de este trabajo, fue el realizado por *Khan, Abdul & Muneerah en 2014*, estos autores al estudiar los efectos producidos por la contaminación con hidrocarburos, tomaron muestras de suelo inalterada (muestras sin

contaminar) y muestras contaminadas e hicieron una comparación de las diferentes mezclas, evaluando parámetros como el color, granulometría, contenido de humedad, permeabilidad y características de compactación. Se encontró que ambas muestras de suelo, al ser no plástico y de gradación uniforme (arena fina a media), la contaminación y el tratamiento posterior aumentaron ligeramente la proporción de granos finos y gruesos en las muestras de suelo tratadas. Una comparación de los resultados de las otras pruebas también reveló la disminución de la permeabilidad, y los cambios en las características de compactación en las muestras de suelo contaminadas. En particular, este trabajo se aproxima significativamente al propósito de esta investigación, debido a que este estudio examina la idoneidad de los suelos tratados para ser reciclados, para su uso (construcción en el sitio), y se centran en el efecto de la contaminación y su posterior reparación en las propiedades de ingeniería de los suelos. Se debe anotar que en este documento los resultados son expresados de forma cualitativa y no cuantitativa.

En el año 2013 *Mohammed & Abdullahi*, realizaron un estudio en Kano-Nigeria, donde a diferencia de los demás estudios encontrados, el objetivo principal fue establecer los efectos sobre las propiedades mecánicas de tres tipos de suelo, arcilla, arena y lateritas, al ser contaminados con 2%, 4% y 6% de tres contaminantes, a saber: *engine oil*, *Low pour point fuel oil (LPFO)* y *Crude oil*, en proporción peso/peso. Para ello se llevaron a cabo ensayos de límites de Atterberg, Proctor, consolidación, CBR, y ensayo triaxial, para muestras contaminadas en laboratorio; obteniendo como resultados importantes que, la resistencia al cortante en el caso de las arcillas aumenta para un 2 y un 4% cuando fue contaminada con *engine oil*, mientras que para un 6% esta resistencia decrece; también se encontró que en arcillas contaminadas con *Crude oil* la resistencia a cortante también decrece para todos los porcentajes de contaminantes evaluado. Aunque los resultados reflejan las tendencias de la resistencia al cortante cuando se aumentan los porcentajes de contaminantes, el estudio no especifica cuáles y como se obtuvieron los valores de cohesión y ángulo de fricción de los suelos, tampoco se especifica para que esfuerzo normal fueron calculadas las resistencias al corte. En cuanto al CBR, el estudio indica que aumenta para el 2% y decrece para un 4 y un 6 % en el caso de la arcilla; los asentamientos incrementaron en el caso de las lateritas

contaminadas con *engine oil* y decrecen para todos los contaminantes en el caso de la arcilla. Es importante mencionar que en estudio no se profundiza en las razones por la cual se da el aumento o detrimento en cada propiedad, pero sin duda, es la fuente que mayor proximidad metodológica tiene con este trabajo.

Finalmente, los estudios relacionados con la estabilización de suelo, fueron importantes para la determinación de los estabilizantes usados en esta investigación y así como las proporciones de los mismos. *Núñez (2011)*, realizó una investigación cuyo objetivo fue determinar la dosificación de un conglomerante mediante el índice plástico de un suelo para estabilizarlo; se analizó entonces el uso de cemento, cal, cloruro de sodio, cloruro de calcio y productos asfálticos, encontrando que para suelos con un índice de plasticidad mayor a 10 (suelo plástico), el conglomerante que mejor comportamiento mostro fue la cal con un porcentaje óptimo de 1% para un pH 12,67. En caso de suelos no plásticos se recomienda el uso de cemento en porcentajes entre 7 y 16%. Referente al uso de suelo cemento *Serigos (2009)*, afirma que los porcentajes óptimos de cemento en la estabilización de suelos están entre un 11 y un 20%, adicionalmente menciona la mayoría de los suelos son aptos para estabilizar con cemento a excepción de suelos con alto contenido de materia orgánica. *Huezo & Orellana (2009)*, obtuvieron en su investigación aumento en los valores de CBR al estabilizar suelos con cal y un aumento en la resistencia a la compresión simple inconfina de entre 20 y 30% para tres días de curado, a los 7 días de curado el aumento obtenido fue del orden entre 40 y 50% y la resistencia obtenida a los 90 días mostró un aumento entre el 60 y 70%.

2.2 ANTECEDENTES

A nivel local, en el departamento de Santander y en la ciudad de Cartagena (Refinería de Ecopetrol, Zona Industrial de Mamonal), por ejemplo, existen amplias zonas dedicada a la refinación del petróleo y numerosas estaciones de servicio, ambas actividades consideradas como potencialmente contaminantes (Ambiente & Instituto Geológico y Minero de España,

2007), motivando así a desarrollar estudios sobre el particular, siendo los contaminantes petróleo y gasolina.

Rodríguez (1999); desarrolló en la ciudad de Cartagena un estudio entorno a la contaminación con un hidrocarburo pesado (mezcla de ACPM, kerosene y lubricantes) en suelos aledaños a la estación de servicio TEXACO ubicada en el barrio Manga de esta ciudad. Se seleccionaron dos fracciones de suelo las cuales fueron contaminadas. Durante dicho proceso, se realizaron mediciones de infiltración en sentido vertical y horizontal, concluyendo que la infiltración de la mezcla de hidrocarburos tendió a disminuir en función del tiempo. *Contreras & De la Rosa (2006)* demostraron a través de un estudio que el factor que tenía mayor influencia en la rapidez de un proceso de degradación era la cantidad de microorganismos utilizados en los procesos de biorremediación; al aplicar a muestras de suelo contaminadas una población micro bacteriana (*pseudomona sp.*) con gran capacidad de degradación de hidrocarburos; sin embargo, en este estudio, al igual que en otros consultados donde el objetivo era biorremendar el suelo, no se realiza ningún tipo de análisis a cerca de las propiedades mecánicas de este y los efectos de la descontaminación en los mismos. El desarrollo de un modelo matemático les permitió concluir que con una población autóctona de 1×10^{-5} mg/g se obtendrían resultados satisfactorios a los diez meses después de iniciar un tratamiento.

Ceballos & Lorduy (2013), elaboraron para la ciudad de Cartagena un diagnóstico de suelos contaminados y/o susceptibles a contaminación con hidrocarburos. Para lograrlo, realizaron prueba in-situ, en 32 estaciones de servicio de la ciudad, de las cuales el 62,5% se clasificaron como zona de alto riesgo, mostrando un potencial de contaminación bastante alto. Aunque el diagnóstico se refiere a contaminación por hidrocarburos, los resultados muestran contaminación por gasolina. Dentro de las conclusiones relevantes para este estudio, se encuentra que la gasolina tiene un alto potencial de contaminación debido a su capacidad migratoria, logrando alcanzar grandes distancias según el tipo de suelo en que interactúe. Además, se afirma que los residuos industriales presentan las concentraciones de los derivados de petróleo más peligrosas, afectando la estructura del suelo debido a la ruptura de

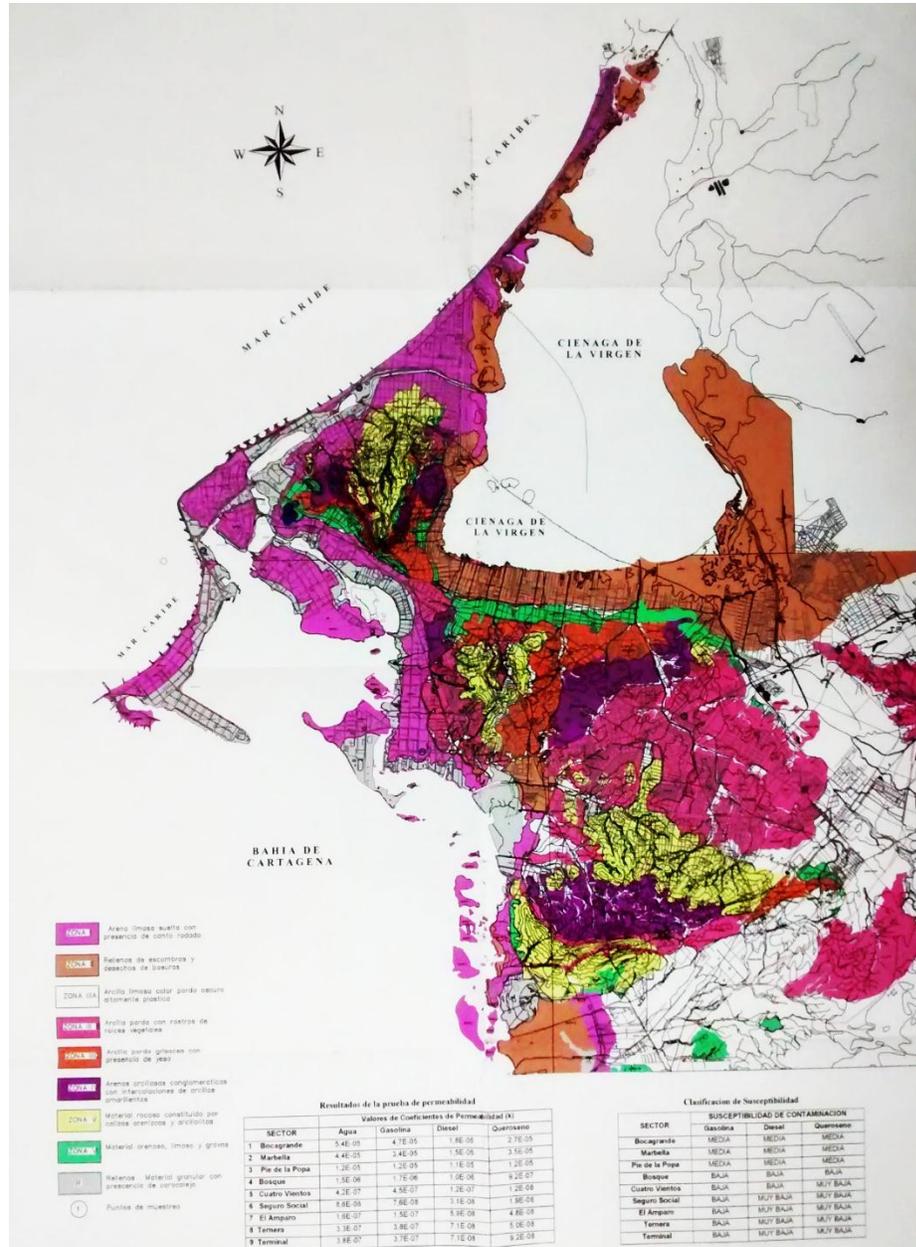
los agregados, provocando el aumento de la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico. El tipo de suelo con mayor persistencia de sustancias tóxicas fueron las arcillas. Se encontró que entre más pequeñas fueron las partículas aportan mayor área superficial para la absorción de los productos químicos. Cabe resaltar que este estudio no fue experimental, dado que solo buscaban realizar un diagnóstico. Lo anterior implica que los resultados obtenidos no son exactos y no muestran, de manera precisa, el comportamiento de un hidrocarburo en el suelo; esta imprecisión fue solventada por los autores simulando una condición crítica, en la cual el contaminante se moviera al máximo posible. Sin embargo, no se especifica, al menos en la metodología, de qué forma lograron dicho efecto. El hecho de que se encuentren zonas susceptibles a contaminación con gasolina aporta justificación a la realización de esta investigación.

Domínguez & Anaya (2008), realizaron un estudio considerado complementario al anterior puesto que aunque el objetivo era determinar las zonas susceptibles a contaminación con gasolina, diésel y querosene en base a los distintos tipos de suelo y sus permeabilidades en la ciudad de Cartagena; se presenta un mapa de susceptibilidad Figura 1, donde se especifican los sitios de la ciudad donde los contaminantes tendrían mayor facilidad de infiltración, lo anterior permitió establecer posibles zonas idóneas para la extracción de material de muestra para este estudio.

El aporte más significativo de la revisión bibliográfica lo hace un estudio realizado en el departamento de Santander (Colombia), sede de una de las más grandes refinerías del país. La metodología aquí sugerida, que comprende la contaminación de muestras en laboratorio con distintas concentraciones de gasolina, es la que se aplicará en este estudio. Los autores tomaron muestras inalteradas (sin contaminar) de tipo arcilloso, que son suelos que por su baja permeabilidad retienen el petróleo, permitiéndole cambiar sus propiedades de manera más significativa que en un suelo granular. Las muestras fueron llevadas a laboratorio, donde se separaron en varios grupos de muestreo, y se les contaminó con concentraciones en peso de 5, 10, 15 y 30%. Luego se determinaron todas las propiedades que se estudian en la mecánica de suelos, como límites de Atterberg, granulometría, humedad, masa unitaria de

los suelos, permeabilidad, consolidación y resistencia al cortante. Teniendo la muestra patrón (sin contaminar) y las muestras contaminadas con cada uno de los porcentajes de hidrocarburos, se determinó el efecto, cuantitativamente, del hidrocarburo en el suelo. En forma general, se pudo determinar que las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos se ven afectadas por la presencia de un contaminante. En este caso, el contaminante fue el crudo proveniente de locaciones petroleras. Se recomendó continuar los estudios aumentando el número de muestras de suelo ensayadas con el fin de verificar el nivel de afectación de estas propiedades, con miras a plantear soluciones de remediación de acuerdo con el tipo de suelo. El hecho de que, en la práctica, nadie construye en suelos ya remediados se ve reflejado en que, durante la revisión bibliográfica, la mayor limitación que se encontró fue la escasa información acerca de la modificación en las propiedades mecánicas y de soporte de los suelos que han sido contaminados con hidrocarburos. De acuerdo con el estado del arte son muy pocos los estudios encaminados específicamente a la evaluación de las propiedades del suelo que son relevantes a la hora de construir; si bien el tema de la contaminación de suelos con hidrocarburos posee una vasta bibliografía que lo respalda, la mayoría de estos conservan un enfoque ambiental, llevando a cabo estudios de bioremediación de suelos, y aplicando diferentes métodos para tal fin, procesos que favorecen la bioremediación etc., sustentados con interesantes trabajos experimentales. En cuanto a estudios locales es preciso anotar, que, aunque evalúan el comportamiento de diversos contaminantes en los suelos de la ciudad, los resultados no poseen el alcance que este estudio se propone. Por lo expuesto anteriormente, el proceso de revisión bibliográfica se tuvo que encaminar específicamente a la definición de conceptos básicos, propiedades y efectos de los hidrocarburos en los suelos (teniendo en cuenta el enfoque de cada artículo), ensayos para la determinación de los contenidos de hidrocarburos en los suelos, estándares que permiten declarar un suelo como contaminado y las teorías existentes en la mecánica de suelos, como base para el marco referencial. Otras fuentes consultadas sí mostraron acercamiento con los objetivos del presente estudio, lo cual se convirtió en una valiosa base para el desarrollo de la investigación. Precisamente por la existencia de muy poca información que abarque detalladamente la temática especificada, esta investigación se convierte en innovadora.

Figura 1. Mapa de susceptibilidad de contaminación de suelos en la ciudad de Cartagena.



Fuente: Mapa de susceptibilidad de Contaminación de los suelos para la ciudad de Cartagena, expuestos a combustibles: Gasolina, Diesel, Querosene (Dominguez & Anaya, 2008). Fotografía, cortesía de Tomás Oyola Figueroa.

2.3 MARCO TEÓRICO

El suelo es, *El agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre partículas* (Das, Braja M., 1985, pág. 1). La anterior definición implica que, contrario a la creencia común de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas no sujeta a ninguna organización, posee una estructura definida y propiedades que varían “vectorialmente” (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Precisado el concepto de suelo para la ingeniería civil, queda por definir la importancia de dicho material en el campo de la construcción. *El suelo se usa como material de construcción en distintos proyectos de ingeniería civil, y sirve para soportar las cimentaciones estructurales* (Das, Braja M., 1985, pág. 1). Según el ingeniero José España, todas las obras construidas deben estar debidamente ancladas en el estrato de suelo resistente apropiado, de manera que éste logre soportar las cargas impuestas por la súper-estructura. Por tanto, es indispensable para el estudio de la ingeniería civil conocer detalladamente las propiedades de los suelos, como se comportan y establecer procesos para mejorarlos.

2.3.1 Sistemas de clasificación de suelos.

Se definieron las características del suelo utilizado, a través de los sistemas de clasificación unificado de suelos (SUCS) y el método definido por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO). Ambos métodos se basan en el ensayo de granulometría y los ensayos de límites de Atterberg para definir la naturaleza de los suelos como gravas, arenas, arcillas y turbas en el caso de SUCS, y clasificar el suelo en siete grupos (tres grandes grupos perteneciente a los suelos granulares y cuatro grupos para los suelos finos) para el caso del método definido por la AASTHO.

2.3.2 Mecánica de suelos.

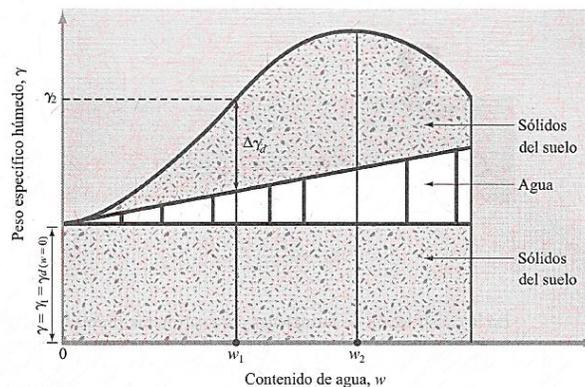
Las propiedades que se tratan en este apartado son: densidad del suelo, capacidad de soporte (CBR), resistencia al cortante (enfocado en los parámetros de ángulo de fricción interna y

cohesión) y consolidación, puesto que son éstas las propiedades o parámetros que rigen el comportamiento mecánico de un suelo y permiten estimar su comportamiento ante la imposición de cargas por parte de una estructura.

2.3.2.1 Compactación de suelos.

En forma general, el objetivo de la compactación de los suelos es aumentar la densidad del material, mediante la disminución de los espacios vacíos, para obtener mejor comportamiento mecánico, tanto de resistencia al cortante, como de consolidación (Das, Braja M., 1985), propiedades que se estudiarán más adelante. De lo anteriormente dicho se puede decir que la propiedad que determina qué tan compacto está el suelo, es el peso específico seco, aunque la humedad también juega un papel fundamental en el proceso de compactación. Podría pensarse que el suelo con una humedad de 0% (completamente seco) tendría el máximo peso específico posible, pero la experiencia de la mecánica de suelos ha demostrado que no es así. La práctica ha demostrado que, partiendo de humedad cero, incrementando el contenido de agua también aumenta el peso específico del material. Pero luego de cierto valor de humedad, se puede notar que el valor de peso específico empieza a decaer nuevamente. Entonces, en base a esto, es lógico pensar que existe un contenido de humedad tal que provee el peso específico máximo del material. A ese contenido de humedad se le conoce como **humedad óptima**, Figura 2.

Figura 2. Peso específico vs contenido de humedad.



Fuente: (Das, Braja M., 1985, pág. 52)

Para determinar el peso específico máximo y la humedad óptima, se ha estandarizado el ensayo Proctor (Proctor, 1993). La metodología para el ensayo Proctor estándar se encuentra descrita en la norma INV E-148-07, mientras que el procedimiento necesario para llevar a cabo la prueba Proctor modificada se detalla en las normas D-1557 de la ASTM y Prueba T-180 de la AASHTO.

La energía de compactación se determinará de acuerdo con la siguiente expresión

$$E = \frac{(No. \frac{golpes}{capa}) * (No. capas) * (mg) * (caida)}{Volumen de Molde} \quad (1)$$

Después de realizar la prueba, se medirá el volumen y la masa de la muestra ya compactada, y se calculará el peso específico de la misma, como sigue:

$$Y_d \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M(kg)}{V(m^3) * \left(1 + \frac{w(\%)}{100} \right)} \quad (2)$$

2.3.2.2 Resistencia al cortante.

La propiedad más importante del suelo, desde el punto de vista de la ingeniería civil. El suelo debe ser capaz de resistir las grandes cargas que le imponen las estructuras construidas sobre él. “Mohr (1900) presentó una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante” (Das, Braja M., 1985, pág. 207). Para determinar qué tan resistente es el suelo a cortante, se deben definir dos conceptos básicos:

- Ángulo de fricción interno: Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y sus partículas, especialmente si son angulares, presentan una buena trabazón, tendrán fricciones internas altas. En cambio, los suelos finos las tendrán bajas.

La fricción interna de un suelo está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal "p" aplicada a dicho plano. Los valores de este ángulo llamado "ángulo de fricción interna" f , varían de prácticamente 0° para arcillas plásticas, cuya consistencia este próxima a su límite líquido, hasta 45° o más, para gravas y arenas secas, compactas y de partículas angulares. Generalmente, el ángulo f para arenas es alrededor de 30° (Das, Braja M., 1985).

- **Cohesión:** Es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad. La cohesión se mide kg/cm^2 . Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de 0.25 kg/cm^2 a 1.5 kg/cm^2 , o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula (Das, Braja M., 1985).

Basado en estos dos conceptos se desarrolla toda la teoría de la resistencia de los suelos. Asumiendo una muestra granular de suelo a la cual se le aplica un esfuerzo normal σ , provocando en su interior un esfuerzo cortante τ . Suponiendo un estado de esfuerzos tales que sea inminente la falla de la muestra, el ángulo de fricción interna de la muestra estará dado por:

$$\tan \Phi = \frac{\tau}{\sigma} \quad (3)$$

De donde:

$$\tau = \sigma * \tan \Phi \quad (4)$$

Que describe el comportamiento a cortante de un suelo en función del esfuerzo normal que se le aplique. Ahora bien, para una muestra de suelo arcilloso, al no poseer gran fricción interna, depende casi que completamente de la cohesión entre partículas para aportar a la resistencia del suelo. Por tanto, para un suelo arcilloso (Covo A.I., 2003):

$$\tau = C \quad (5)$$

En el caso más general, donde se encuentren suelos arenosos mezclados con arcilla o limo, la ecuación para calcular la resistencia saldrá de la suma de la resistencia de los granos de arena más la cohesión entre las partículas de arcilla. Así bien (Covo A.I., 2003):

$$\tau \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) = \sigma \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) * \tan\Phi + C \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) \quad (6)$$

Donde:

τ : Resistencia al cortante del suelo: ton/m²

σ : Esfuerzo efectivo: ton/m²

Φ : Ángulo de fricción interna

C : Cohesión: ton/m²

Esta ecuación se presta para todos los casos de suelos. Si es un suelo mayormente arcilloso se puede prescindir del primer término, en tanto si es un suelo granular, el segundo término es despreciable (Covo A.I., 2003).

2.3.2.3 CBR.

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1'' o 0.2'', expresada en porcentaje en su respectivo valor estándar. También se dice que mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo; por esta razón se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo, determinado utilizando el ensayo de compactación Proctor estándar o modificado. El método CBR comprende tres (3) ensayos siguientes: *a) Determinación de la densidad y humedad; b) Determinación de las propiedades expansivas del material; c) Determinación de la resistencia a la penetración.* El comportamiento de los suelos varía de acuerdo a su grado de alteración (inalterado y alterado) y a su granulometría y características físicas (granulares, finos, poco plásticos) (Chang, 2010).

1.3.2.4 Consolidación.

Luego de determinar si un suelo es capaz de tolerar las cargas impuestas por las estructuras, se debe determinar su capacidad de hacerlo sin sufrir excesivas deformaciones, es decir, que los asentamientos sean pequeños. Existen, por definición, tres tipos de consolidación, a saberse:

- *“Asentamiento inmediato, provocado por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de agua. Los cálculos de los asentamientos inmediatos se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad”* (Das, Braja M., 1985, pág. 151).
- *“Asentamiento por consolidación primaria, es el resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos debido a la expulsión del agua que ocupa los espacios vacíos”* (Das, Braja M., 1985, pág. 151).
- *“Asentamiento por consolidación secundaria, se observa en suelos saturados cohesivos y es resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo. Éste sigue al asentamiento por consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante”* (Das, Braja M., 1985, pág. 151).

Para cada uno de los tipos de asentamiento existen ensayos de laboratorio, encaminados a determinar la deformación máxima que puede tener un espécimen bajo una cierta condición de carga. El procedimiento a emplear se describe en la norma I.N.V. E –151–07.

La consolidación divide a las arcillas en dos grandes grupos, a saberse:

- Normalmente consolidadas: son las arcillas que a lo largo de su edad geológica no han estado sometidas a esfuerzos superiores a los que están sometidas actualmente. Este tipo de arcillas normalmente suele tener grandes asentamientos al ser sometidas a cargas de estructuras
- Sobre consolidadas: son aquellas que han estado sometidas a esfuerzos mayores a los que está sometida actualmente. Este tipo de arcilla suele tolerar grandes cargas sin tener mucho asentamiento, hasta llegar a una presión límite, donde empieza a comportarse

como una arcilla normalmente consolidada. Esa presión límite se conoce como esfuerzo de pre consolidación.

La arcilla sobre consolidada suele tolerar esfuerzos grandes al principio con pocas reducciones en la relación de vacíos, hasta el esfuerzo límite, donde las reducciones de la relación de vacíos se hacen más notorias.

Entonces se puede calcular la relación de pre consolidación como (Das, Braja M., 1985):

$$OCR = \frac{\sigma'c \left(\frac{kN}{m^2} \right)}{\sigma' \left(\frac{kN}{m^2} \right)} \quad (7)$$

Donde:

$\sigma'c$ Es presión de pre-consolidación: kN/m^2

σ' Es esfuerzo efectivo vertical existente: kN/m^2

Si OCR es mayor de 1, significa que la arcilla está sobre consolidada. De lo contrario, la arcilla es normalmente consolidada.

2.3.3 La Gasolina como contaminante.

Los derivados energéticos, como su nombre indica, son aquellos que pueden ser usados como combustible en algún proceso mecánico (Wauquier, 1994). Entre todos estos derivados, destaca la gasolina, sustancia ampliamente utilizada en el mundo como combustible para vehículos de todo tipo. Cabe resaltar, entonces, la importancia que posee la gasolina en el estilo de vida de la sociedad actual.

La gasolina es la mezcla de hidrocarburos líquidos volátiles e inflamables obtenidos del petróleo crudo; se produce a través de varios procesos de destilación fraccionada de petróleo, la condensación o la adsorción de gas natural, la descomposición térmica o catálica de petróleo o sus fracciones, la hidrogenación de gasógeno o carbón, o a

través de la polimerización de hidrocarburos de bajo peso molecular (Ceballos & Lorduy, 2006).

Al igual que el petróleo, puede ser clasificada en tres grandes categorías: gasolina para aviación, gasolina para motor y nafta.

En Colombia se manejan distintos tipos de gasolina para motor, según su octanaje, las más conocidas son: Gasolina Corriente, Gasolina Extra, la Diesel (Corriente y Extra). Las pruebas a realizar en este estudio serán con gasolina corriente, por lo que la atención se dirigirá de manera exclusiva a este tipo de combustible. (Ceballos Candanoza & Lorduy Barguil, 2006)

Gasolina Corriente: Es una mezcla compleja de 200 a 300 hidrocarburos distintos, formada por fracciones combustibles provenientes de diferentes procesos de refinación del petróleo, tales como destilación atmosférica, ruptura catalítica, ruptura térmica, alquilación, reformado catalítico y polimerización, entre otros. Es tratada químicamente con soda caustica para eliminar compuestos que tienen comportamiento corrosivo y pueden generar depósitos en los sistemas de admisión de combustibles de motores. Luego se mezcal de tal forma que el producto final tenga un índice antidetonante IAD (Ron + Mon/2) de 81 octanos como mínimo”. (Ceballos & Lorduy, 2006).

“Se clasifica como un líquido inflamable de acuerdo con la Norma 321 de la NFPA (National Fire Protection Association). Es un producto volátil que genera vapores desde una temperatura de -43°C , los cuales a mezclarse con el aire en proporciones de 1.1 a 7.6% en volumen producen mezclas inflamables y explosivas” (Ceballos & Lorduy, 2006).

Existen recomendaciones acerca de la no utilización de este producto con fines distintos al que normalmente posee, puesto que los vapores que generan son más pesados que el aire, lo que le permite localizarse en fuentes de ignición tales como pilotos de estufas, interruptores de corriente eléctrica, toma corriente y puntos calientes tales como lámpara incandescentes

(Ceballos & Lorduy, 2006) La anterior recomendación resulta vital para el adecuado manejo este producto durante los procesos de contaminación de las muestras en el laboratorio.

2.3.4 Contaminación de suelo y procesos de remediación.

Se puede definir contaminación, como el proceso a través del cual un material ve alteradas, de manera negativa, sus características físicas, químicas o biológicas por acción de un compuesto químico (Ambiente & Instituto Geológico y Minero de España, 2007).

Dependiendo de tipo de suelo, su composición, su textura, los hidrocarburos se presentan y permanecen en el suelo, ya que según las características del suelo los hidrocarburos se adhieren o penetran con mayor fuerza y la permanencia del mismo en el suelo es mayor. A continuación, se muestra la presencia de hidrocarburos en los tipos de suelo (Ceballos a & Lorduy, 2006):

- Suelo arenoso: Los hidrocarburos penetran con mayor rapidez, en mayor cantidad y a mayor profundidad.
- Suelo arcilloso o rocoso: Los hidrocarburos no penetran con facilidad, penetran en pocas cantidades y a poca profundidad y por ende se retira mediante recojo y/o lavado de manera rápida.
- Suelos con alto contenido de materia orgánica: Los hidrocarburos se adhieren fuertemente a las partículas y restos vegetales de tal manera que permanece por más tiempo en el ambiente.

Se puede decir que un suelo está contaminado cuando existe un riesgo inaceptable para la salud de las personas o los ecosistemas. Para poder afirmar que ya no está contaminado, deberá verificarse que el riesgo es aceptable. Evidentemente, si se pudiese actuar de manera que la concentración final de la sustancia o sustancias que contaminan el suelo se redujese a cero, desaparecería el riesgo. Pero esto es, en la mayoría de los casos, técnica y económicamente inviable, y en todos ellos, innecesario por cuanto sería suficiente reducir la concentración de la sustancia en el suelo hasta que se asegure que no existe peligro asociado a su presencia en ese suelo para el uso actual y futuro previsible, Es decir, que se reduce

hasta alcanzar el valor de la máxima concentración aceptable (aquella que verifica el máximo riesgo aceptable) de la sustancia en el suelo.

Si la aplicación de un tratamiento de descontaminación se realiza hasta alcanzar una concentración residual de la sustancia en el suelo distinta de cero, entonces se dice que ha quedado “contaminación remanente”. El término no lleva implícito que la presencia de esta sustancia suponga un riesgo inaceptable que implique que el suelo, a pesar del tratamiento, siga contaminado (Ambiente & Instituto Geológico y Minero de España, 2007).

El transporte de contaminantes en un suelo está ligado tanto a las características del suelo, como la porosidad y la permeabilidad, como la naturaleza misma de la sustancia contaminante, los cuales son drenados a través del sistema de poros del suelo y dependiendo de su solubilidad pueden tener mayor o menos penetración en este. Existen diferentes procesos que influencia el transporte de contaminantes en un suelo, como se indica en la Tabla 1 (Mojica, 2008).

En los suelos los contaminantes solubles se infiltran fácilmente a través del sistema poroso, mientras que los insolubles e hidrófobos, como el petróleo, pueden unirse a la superficie de las partículas de la capa superior del suelo o moverse rápidamente hasta zonas más profundas a través de los poros y fisuras de éste. En el caso de los hidrocarburos a pesar de ser sustancias hidrófobas de naturaleza no iónica y no polar, algunos alcanzan zonas profundas del perfil del suelo e incluso aguas subterráneas al ser arrastradas adheridas a las partículas de suelo, mas no solubilizadas en el agua ya que en este tipo de sustancias la adsorción y desorción es inversamente proporcional a la solubilidad. Una vez los productos petrolíferos alcanzan el nivel freático, flotan sobre la lámina de agua y adoptan su flujo, con lo que es posible que emerjan nuevamente a aguas superficiales con su composición original o transformada en sustancias más inocuas e incluso tóxicas (Mojica, 2008, pág. 40).

Tabla 1. Procesos naturales que influyen en el destino de sustancias en el suelo.

PROCESO	TIPO DE SUSTANCIAS	CONSECUENCIA
	QUÍMICA	
Adsorción	Orgánica	Frenado
Precipitación	Inorgánica	Frenado
Intercambio de iones	Inorgánica	Frenado
Filtraciones	Orgánica/ Inorgánica	Frenado
Oxidación y reducción química	Orgánica/ Inorgánica	Transformación/Frenado
Absorción biológica	Orgánica/ Inorgánica	Frenado
Biodegradación	Orgánica	Transformación
Hidrólisis	Orgánica	Transformación
Volatilización	Orgánica	Eliminación o traspaso intermedio
Disolución	Orgánica/ Inorgánica	Activación de la movilidad
Consorción	Orgánica	Activación de la movilidad
Ionización	Orgánica	Activación de la movilidad
Complejización	Inorgánica	Activación de la movilidad
Fase unmiscible	Orgánica	Varias divisiones

Fuente: Evaluación del potencial de biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados procedentes de PetroSantander (Colombia) INC. (Mojica, 2008, pág. 41)

Desde el punto de vista técnico, las estrategias para la recuperación de un suelo se pueden agrupar según:

- **Destrucción o modificación de los contaminantes.** Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante para destruirlo o convertirlo en otro u otros que no supongan un peligro.
- **Extracción o separación.** Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica). El contaminante es retirado del suelo, pero pasa a otro medio que tendrá que ser gestionado y/o tratado.

- **Aislamiento o inmovilización del contaminante.** Los contaminantes son estabilizados, solidificados o inmovilizados en el propio suelo con el uso de métodos químicos o físicos. Las sustancias contaminantes siguen en el suelo por lo que se requiere vigilancia y control posteriores.

Las estrategias que persiguen que los contaminantes dejen de estar presentes en el suelo (por destrucción, cambio a otras sustancias no tóxicas o extracción) se denominan técnicas de descontaminación; cuando lo que se busca es impedir la migración de los contaminantes (por aislamiento, inmovilización o traslado a vertedero) se conocen como técnicas de contención. Solamente las primeras proporcionan soluciones permanentes, ya que las técnicas de inmovilización o traslado a vertedero son soluciones de ingeniería que, en mayor o menor grado, tendrán un tiempo máximo de validez.

Por otro lado, las técnicas de recuperación también pueden clasificarse en atención al lugar en el que se lleva a cabo de aplicación de la técnica, pudiendo distinguirse entre:

- **Técnicas In situ.** Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado en el mismo lugar en el que se encuentra y sin que sea necesaria la excavación del terreno.
- **Técnicas Ex situ.** La realización de este tipo de tecnologías requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento, que puede realizarse en el mismo sitio (on situ) o lejos de él (off situ) (Ambiente & Instituto Geológico y Minero de España, 2007, pág. 28).

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), existen distintas técnicas innovadoras para el tratamiento de los suelos contaminados. La Tabla 2 muestra, de manera concisa, en que consiste cada uno de ellos.

2.3.5 Estabilización de suelos.

El suelo, en su estado natural, no siempre se encuentra en las mejores condiciones. Altas humedades e índices de plasticidad. Baja resistencia al cortante. Estas características vuelven al suelo indeseable desde el punto de vista ingenieril, por lo cual se hace prioridad establecer un método para mejorar sus capacidades. Este método se conoce en el ámbito de la ingeniería civil como estabilización. La teoría define dos tipos de estabilización:

- **Estabilización mecánica o física:** Aplicar energía mecánica al suelo para reducir vacíos y densificar, para así lograr altas resistencias, parece un principio básico. Este principio se conoce como compactación de suelos, y ha sido estudiado a detalle en la sección 2.3.2.1 de este trabajo.

Tabla 2. Descripción de alguna técnica de tratamiento innovador.

Extracción de vapores del suelo: remoción de vapores contaminantes del suelo (sin excavar) mediante pozos de aspiración. Se recogen los contaminantes para someterlos a un tratamiento ulterior.

Aspersión de aire: inyección de aire en el suelo debajo de la zona contaminada; el aire forma burbujas que suben, llevando contaminantes atrapados y disueltos hasta superficie, donde se pueden capturar con un sistema de extracción de vapores de suelo.

Medidas biocorrectivas: uso de microorganismos, como bacterias en procesos manejados, para descomponer contaminantes orgánicos en sustancias inocuas.

Desorción térmica: calentamiento del suelo a temperaturas relativamente bajas vaporizar contaminantes con un punto de ebullición bajo. Los contaminantes vaporizados se capturan y se retiran para someterlos a un tratamiento ulterior o para destruirlos.

Lavado del suelo: uso de agua o de una solución de lavado y procedimientos mecánicos para depurar suelos excavados y retirar contaminantes peligrosos.

Deshalogenación química: conversión de contaminantes que contienen halógenos (cloro y flúor, por ejemplo) en sustancias menos tóxicas mediante reacciones químicas controladas que retiran o reemplazan los átomos de halógenos.

Enjuague del suelo in situ: inundación subterránea de suelos contaminados con una solución que arrastra los contaminantes hasta un lugar donde pueden extraerse.

Fuente: Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras. (Environmental Protection Agency, 1996).

- **Estabilización química:** Alterar las propiedades químicas de un suelo añadiéndole una sustancia determinada, en dosis adecuadas, se considera una forma de estabilización.

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual, mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí, de modo que produce un incremento en su resistencia. La estabilización mecánica es la alteración de las propiedades del suelo cambiando su granulometría por medio de agregar o sacar partículas o por compactación del suelo (Solminihac, Echeverria, & Thenoux, Estabilización química de suelos: Aplicacion a la construccion de pavimentos, pág. 1).

Dentro de la estabilización química, existen varias clases, dependiendo del tipo de material usado para estabilizar, y del tipo de suelo a estabilizar, Tabla 3. Los materiales para estabilizar más utilizados son: asfalto, cemento y cal. La siguiente tabla muestra varios tipos de suelo, y el método más apropiado para estabilizarlos.

Tabla 3. Métodos de estabilización para distintos tipos de suelo.

Tipo de suelo	Método de estabilización más efectivo
Suelo granular grueso	Estabilización mecánica, suelo-asfalto Suelo-cemento
Suelo granular fino	Estabilización mecánica, suelo-cemento
Arcilla de baja plasticidad	Compactación, suelo-cemento, químicos a prueba de agua, modificación con cal
Arcilla de alta plasticidad	Estabilización con cal

Fuente: Tomado y Modificado de: (Solminihac, Echeverria, & Thenoux, Estabilización química de suelos: Aplicacion a la construccion de pavimentos, pág. 3).

Cal: El carbonato de calcio, también conocido como cal, es un material usado como estabilizante de suelo. “La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general, los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 -75 μ m- y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. Los suelos que contienen cantidades

significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales” (Nacional Lime Association, 2004).

Cemento: El cemento portland, componente vital de un material tan utilizado como el concreto, también puede usarse para estabilizar suelos de manera eficiente, aumentando significativamente la resistencia del suelo.

La dosificación de un suelo estabilizado con cemento para una explanada tiene como objetivo obtener la combinación óptima de cemento, suelo, agua, y en su caso, aditivos, que cumpla las especificaciones técnicas fijadas sobre sus características en estado fresco y endurecido. La dosificación debe tener además las condiciones de ejecución, especialmente la trabajabilidad, la calidad pretendida y la economía de la obra (Instituto Español del cemento y sus aplicaciones , 2008).

Asfalto: Se emplea asfalto o bitumen, para lograr propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación, en el suelo. En suelos friccionantes puede considerarse, además de la estabilización química, estabilización mecánica. La estabilización de cada suelo, debe ser investigada en forma independiente, a partir de la granulometría, plasticidad, densidad y otras propiedades del suelo. Para un peso específico de material igual a 1.64 g/cm^3 , se le debe añadir 10% de asfalto y para 1.75 g/cm^3 , no es necesario su aplicación, tal como lo muestra el siguiente cuadro: (Ministerio de Vivienda de Perú, 2006). Los porcentajes de contenido de asfalto, de acuerdo con el peso específico del material, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Contenido de Asfalto para estabilizar.

Contenido de Asfalto (%)	0	2	4	6	8	10
Peso específico del Material (g/cm^3)	1,75	1,71	1,68	1,66	1,64	1,64

Fuente: Tomado y Modificado de CE.020 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES. (Ministerio de Vivienda de Perú, 2006).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar qué tipo de estabilizante, cemento, cal o asfalto, es el adecuado para estabilizar suelo areno-arcilloso sometido a procesos controlados de contaminación con diferentes concentraciones de gasolina; mediante la comparación de los parámetros que rigen el comportamiento mecánico del suelo, bajo dos condiciones: contaminadas y sin contaminar, con el fin de proponer alternativas para convertir un suelo contaminado en un material apto para la construcción.

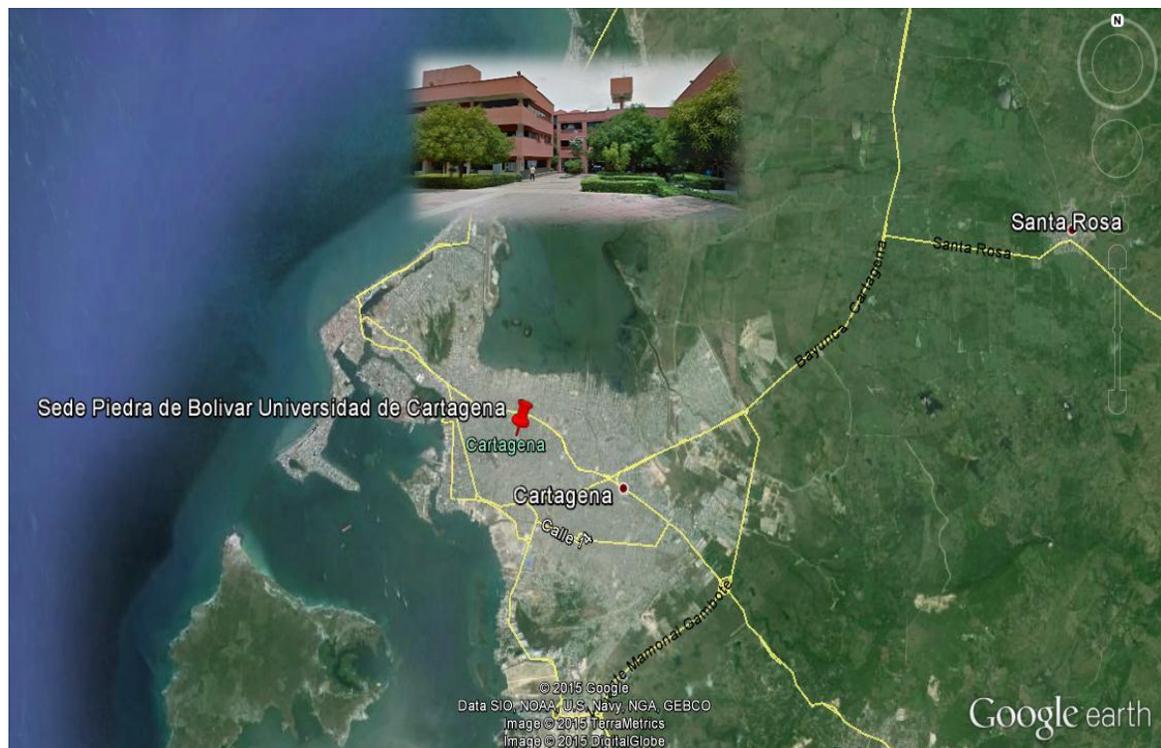
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar muestras de suelo areno-arcilloso (contaminado y sin contaminar), mediante la evaluación de los parámetros que rigen el comportamiento mecánico de éste, tales como ángulo de fricción, cohesión, CBR, densidad de compactación, humedad óptima y coeficiente de consolidación.
- Establecer la relación entre variables estudiadas, usando análisis estadísticos. Comparación de datos a través de tablas y gráficos que muestren las variaciones de los resultados de Proctor modificado, CBR, consolidación y ensayo corte directo vs los contenidos en porcentaje de gasolina, cemento, cal y asfalto.
- Implementar un modelo a escala de estabilización, usando los diferentes tipos de estabilizantes (cal, cemento y asfalto), que la teoría sugiere como adecuados para el tipo de suelo estudiado, y determinar el apropiado.

4. ALCANCE

Anteriormente se reconoció el valor que tendría para la ingeniería civil la realización de esta investigación, teniendo en cuenta que pretende tomar un recurso no renovable expuesto a contaminación, estudiar sus propiedades y proponer un alternativa de reutilización del mismo para la construcción; sin embargo, el sólo hecho de realizar estudios de suelo, supone la intervención de diferentes variables, que están sujetas de manera indiscutible a las condiciones ambientales y de carga que una porción de suelo tendría en un terreno. Se controlaron algunas de ellas, como: el tipo de suelo, el tipo de contaminante, la concentración del mismo en el suelo e incluso el proceso de contaminación. Esta complejidad, hizo necesaria una delimitación del tema. Espacialmente, el estudio se limitó a la realización de ensayos a muestras en laboratorio, en las instalaciones de la sede de Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, en los laboratorios de geotecnia y materiales.

Figura 3. Ubicación del Campus Piedra de Bolívar.



Fuente: Imagen tomada y modificada de Google Earth.

Inicialmente la realización de esta investigación se limitó a un periodo de cuatro meses iniciando el día 29 de febrero de 2016 de acuerdo con el cronograma presentado en la propuesta; sin embargo cumplido los cuatro meses, solo se había podido desarrollar la primera etapa, que correspondía a la caracterización de las muestras de suelo, el desarrollo de la fase 1 con todos los ensayos para la muestra sin contaminar, el desarrollo de la fase 2 con todos los ensayos a las muestras contaminadas; así como determinar cuál de los porcentajes de gasolina fue el más desfavorable Tabla 5. La imposibilidad de realizar ensayos triaxiales como se había previsto inicialmente obligó al cambio del ensayo para la determinación de los ángulos de fricción y la cohesión para cada una de las muestras, por el de corte directo, retrasando así la finalización de la primera etapa y forzando a una reprogramación de las etapas del estudio.

Tabla 5. Cantidad de ensayos a realizados para la Etapa 1.

Ensayo	Etapa 1	
	Fase 1: muestra sin contaminar	Fase 2: muestras contaminadas
Proctor modificado	1	4
CBR	1	4
Corte Directo	1	4
Consolidación	1	4

Fuente: Autores.

Como resultado final de este estudio se pudo estabilizar unas muestras de suelo areno-arcilloso que fueron sometidas a un proceso de contaminación bajo condiciones específicas simuladas en el laboratorio. Además, se determinó que el cemento es el estabilizante con el que se obtiene un mejor comportamiento mecánico para un suelo areno-arcillosos después de haber sido contaminado con diferentes porcentajes de gasolina, lo descrito anteriormente corresponde la segunda etapa de la investigación. Para los porcentajes de contaminante estudiados la culminación de la primera etapa, permitió determinar cuál de las concentraciones de gasolina mostró resultados más desfavorables respecto al suelo sin contaminar, dicha muestra fue sometida a procesos de estabilización química con cemento,

cal y asfalto como agentes estabilizadores. Además, se obtuvo una caracterización de las muestras contaminadas con las distintas concentraciones de gasolina, que permitió expresar de manera porcentual las variaciones de cada propiedad estudiada respecto al suelo sin contaminación, y una comparación gráfica de las propiedades de ambos tipos de muestra. Lo anterior fue posible a través del análisis de cada una de las curvas establecidas a través de los ensayos que relacionen la concentración de gasolina con las distintas variables estudiadas, estas fueron humedad óptima de compactación, densidad óptima de compactación, resistencia al cortante, coeficiente de consolidación, ángulo de fricción, cohesión y valores de Proctor y CBR. Estas curvas podrán ser utilizadas en posteriores investigaciones relacionadas con la temática; ya sea usando el mismo tipo de estabilizante u otro con características similares. El desarrollo de la esta primera etapa permitió sugerir una metodología para el estudio y evaluación de las propiedades mecánicas de los suelos contaminados con gasolina.

Como se mostró en el marco teórico, los distintos procesos de contaminación obedecen a infiltraciones del material en el suelo; sin embargo, se debe aclarar que este trabajo no realizó estudios a profundidad sobre el tema de infiltración en los suelos, dado que el desarrollo del mismo implicaba mayor complejidad y aumentaba las limitaciones de tiempo.

Finalmente, es de conocimiento que la intención de este estudio es plantear una alternativa de recuperación de suelos contaminados para fines de ingeniería. Es bien sabido que los usos del suelo en construcción son muy amplios, sin embargo, para las limitaciones de este estudio, los resultados tendrán de igual manera un alcance limitado. La estabilización de suelos contaminados con gasolina permitiría el mejoramiento de las capas superficiales del suelo, por lo que los suelos recuperados podrían ser usados para estructuras que no requieran mucha profundidad en la cimentación o edificaciones pequeñas cuyas zapatas no requieran desplantes profundos y en vías (Hossam F. Hassan, 2005). Esta investigación no contempla la estabilización de suelos para cimentaciones profundas; otro posible uso podía ser la utilización del material como agregado (A.W. Hago, 2006); sin embargo, en todos los casos se deberán realizar los estudios pertinentes que permitan mayor certeza.

5. METODOLOGÍA

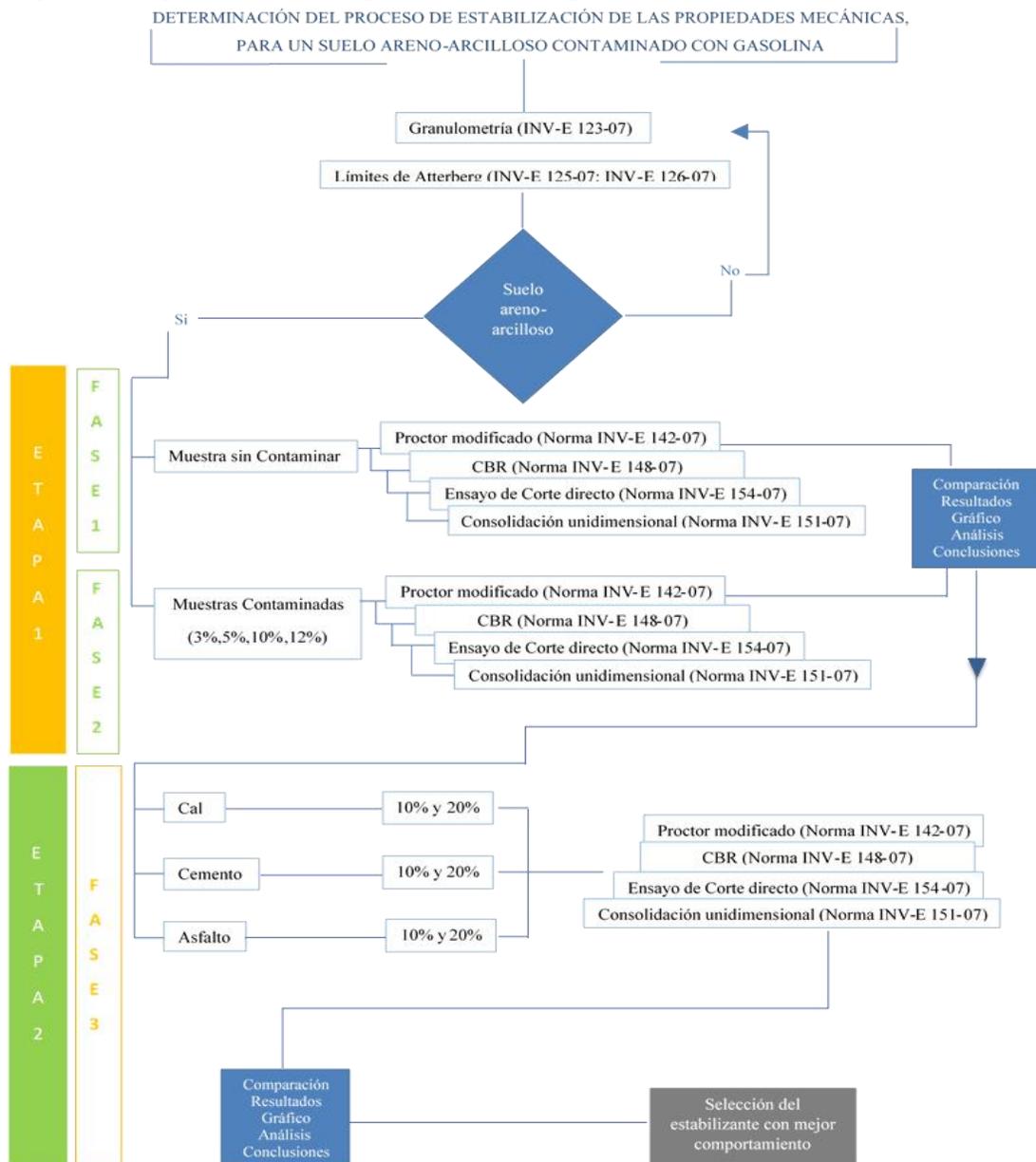
Esta investigación posee un enfoque mixto, pues, presenta un diseño experimental (ensayos de laboratorio), y un estudio con alcance descriptivo (caracterización mecánica de muestras de suelo), lo que permitió elegir el tipo de estabilizante adecuado para recuperar las propiedades mecánicas de un suelo areno-arcillosos contaminado con gasolina.

Es importante mencionar las condiciones en que se desarrolló este estudio, como se mencionó anteriormente, los ensayos tuvieron lugar en los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la universidad de Cartagena. La ciudad de Cartagena está ubicada en el centro del litoral Caribe colombiano, su ubicación geográfica y el estar a nivel del mar establecen marcadas características climatológicas que definieron las condiciones en que se desarrolló este estudio. Según los datos registrados por Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), la ciudad presenta altas temperaturas, teniendo como valor promedio 28°C, alcanzando en algunas épocas los 34°C; la humedad relativa también es un parámetro influyente, que para la zona está en un orden de 83%, la presión atmosférica en la ciudad es de 760 mmHg (CIOH, 2015).

El desarrollo de los ensayos en los laboratorios, durante el primer semestre del 2016 permitió establecer cuantitativamente la variación de los resultados de los ensayos de Proctor modificado, CBR, ensayo Corte directo y Consolidación de un suelo areno-arcilloso contaminado con diferentes concentraciones de un contaminante (3%, 5%, 10% y 12% de gasolina), respecto a muestras del mismo suelo sin contaminar. Lo anterior estableció las condiciones mecánicas de un suelo después de estar contaminado y contribuyó a establecer qué porcentaje de estabilizante (10% y 20% de cal, cemento y asfalto) podría devolverle al suelo o mejorarle sus propiedades mecánicas. Partiendo de la hipótesis de que se puede utilizar en los procesos constructivos suelos contaminados con gasolina corriente, previamente estabilizados sin necesidad de aplicar procesos de bioremediación.

La investigación consta de dos etapas, como se muestra en el esquema metodológico Figura 4. La primera etapa contempló la caracterización del suelo areno arcilloso, la comparación y el establecimiento de la relación entre las variables de estudio descritas anteriormente. La segunda etapa permitió determinar el porcentaje de estabilizante que mostró mejor comportamiento.

Figura 4. Esquema Metodológico de la investigación.



Fuente: Autores.

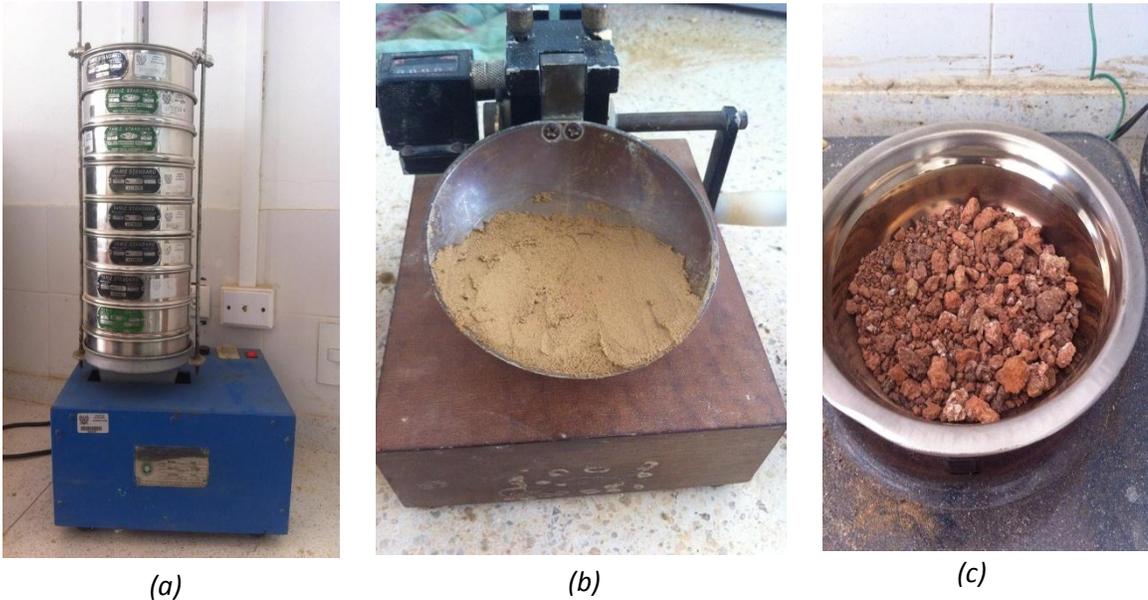
Esta metodología se ciñe al orden definido por los objetivos específicos planteados, y muestra las actividades que realizaron para alcanzar el objetivo final de la investigación. Además, se hace referencia a la normativa que regula los ensayos, y se definen los productos que se obtuvieron con la Etapa 1 y la Etapa 2 de la investigación.

5.1 CARACTERIZAR DEL SUELO Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE RIGEN LA MECÁNICA DE SUELOS.

La metodología que se siguió para conseguir este objetivo fue la siguiente: en primer lugar, se realizó la extracción del material. Posteriormente se caracterizó el material a usar en el estudio. En el alcance se definió que la delimitación de la variable suelo consistiría en especificar cual se utilizaría, por lo que para garantizar que fuese un suelo areno-arcilloso, fueron necesarias las pruebas en el laboratorio que determinaron que efectivamente se estaba en presencia de dicho agregado natural. Fue necesario entonces la realización de ensayos de granulometría (cuya metodología se encuentra descrita en la norma INV-E 123-07), limite liquido (procedimiento detallado en la norma INV-E 125-07) y limite plástico (explicado en la norma INV-E 126-07), ver Figura 5, a dos muestras de suelo, ambas recolectadas en los terrenos del campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena. Los datos de granulometría y límites de Atterberg, permitieron clasificar ambas muestras de suelo de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma AASHTO y en el SUCS.

A través de una inspección inicial realizada el día 2 de marzo de 2016, se pudo determinar que dentro de los límites del campus Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, era posible la extracción del material mixto que se analizó en este estudio; esto se hizo a través de excavación manual a 1,4 metro de profundidad, lo que permitió determinar el lugar donde se realizó la extracción del material a utilizado a lo largo del estudio. Para el desarrollo de la primera etapa se extrajeron 300 kilogramos del material, Figuras 6 y 7. En total se usaron 320 kilogramos de material aproximadamente.

Figura 5. Algunos ensayos correspondientes a la caracterización del material.



Fuente: Autores. (a) Proceso de tamizado del material; (b) Determinación del límite líquido del material, muestra sobre cacerola de Casa Grande; (c) Proceso de secado del material para determinación de humedad.

Figura 6. Material extraído para la realización de los ensayos (Primera extracción).



Fuente: Autores.

Figura 7. Punto de extracción del material utilizado en el estudio. Descapote de 30 cm.



Fuente: Tomado y modificado por los autores de Google Maps.

Dado que la muestra que se utilizó es un material mixto (areno-arcilloso), se omitió el lavado al momento de realizar la granulometría, esto se hizo con el fin de evitar la pérdida del material fino; en su lugar se tomó la muestra y se secó en el horno, posteriormente se realizó el tamizado; lo anterior, acorde con lo descrito en el numeral 3.1 de la norma INV E-123-07.

Luego se clasificó el suelo de acuerdo con los métodos anteriormente mencionados, de las dos muestras de suelo analizadas, la segunda correspondió a la clasificación de areno-arcilloso, como lo muestran los resultados de granulometría presentados en el Anexo B. Una vez obtenido el material se procedió con la caracterización mecánica del material sin contaminar, con el objetivo de obtener una muestra patrón para todo el estudio. Los ensayos que se realizaron en este proceso fueron:

- Proctor modificado (Norma INV-E 142-07)
- CBR (Norma INV-E 148-07)
- Ensayo de Corte directo (Norma INV-E 154-07)

- Consolidación unidimensional (Norma INV-E 151-07)

El número total de ensayos realizados por etapa se presentarán en la Tabla 7, posterior a la descripción de los ensayos.

Ensayo Proctor Modificado: INV-E-148-07; con este ensayo determinó humedad óptima del suelo, se especificaron tres contenidos de humedad para la muestra sin contaminar, con el fin de obtener la gráfica de humedad vs densidad de compactación ASTM D-698. Finalmente se determinó el contenido de humedad del suelo después de la compactación, Figura 8 (a).

Corte Directo: INV-E-154-07; con este ensayo se determinaron los parámetros de resistencia del suelo: cohesión y Angulo de fricción (c y Φ), a partir de los valores obtenidos de esfuerzo cortante y esfuerzo normal. Este ensayo en particular requirió de especial cuidado al preparar las muestras; dado que la contaminación fue controlada, las muestras que se tenían no fueron inalteradas, por lo que fue necesario la preparación de cada probeta en la caja de corte. Para asegurar que las condiciones de la muestra fueran similares a la del campo, se llevaron cada una de las probetas a la densidad del suelo en el campo, es decir, conociendo el volumen que ocuparía la muestra en la caja de corte y la densidad en el terreno se determinó la masa con que se debía preparar cada muestra, estas se llevaron a la humedad optima de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de Proctor. El material entonces, fue mezclado con el porcentaje requerido de gasolina y de agua para el caso de las muestras contaminadas, y de agua para la muestra sin contaminar, posteriormente se vertió en tres capas en la caja de corte aplicando 25 golpes por capa. Para cada uno de los porcentajes de contaminante se ensayaron tres probetas con diferentes cargas y se obtuvo la gráfica esfuerzo cortante vs esfuerzo normal, de donde se obtuvieron los valores de c y Φ . En esta fase se obtuvo resultados de corte directo para la muestra sin contaminar, Figura 8 (b).

Figura 8. Registro fotográfico de ensayos realizados.



(a)

(b)

Fuente: Autores. (a) Probeta después de haber realizado la compactación con el martillo, ensayo de Proctor modificado; (b) Carga impuesta a probeta 16 kg, ensayo de corte directo.

CBR: Este método es muy utilizado en ingeniería para evaluar la resistencia potencial de materiales de sub-rasante, sub-base y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El procedimiento que se siguió para la realización del ensayo de CBR fue el que se encuentra descrito en la norma I.N.V- E – 148-07. Para este ensayo, al igual que en de Proctor, fue necesario un buen mezclado, puesto que la diferencia de densidades entre gasolina y el agua, hacía que al agregar agua a la muestra contaminada se formaran especie de bolsas de material que atrapaba el agua, las cuales fue necesario deshacer. En esta fase se obtuvo resultados de CBR para la muestra sin contaminar. Figura 9.

Figura 9. Ensayo de CBR, en la imagen el pistón penetra una muestra contaminada con 5% de gasolina.



Fuente: Autores

Ensayo de Consolidación: Se obtuvo el valor del índice de consolidación para la muestra sin contaminar, que permitirá el cálculo de los asentamientos presentados en el suelo ante la imposición de cargas para casos puntuales. El procedimiento empleado se describe en la norma INV-E 151-07. De la muestra de suelo se tomaron 44.37 g de material que pasó el tamiz No. 40; este material, después de secado, se llevó hasta la humedad natural del terreno 11.77% y con él se preparó la probeta. De acuerdo con la presión que tiene el material en el terreno se calcularon los incrementos de cargas (4kg, 8kg, 16 kg y 64 kg); estos últimos fueron ajustados de acuerdo con los pesos encontrados en el laboratorio de Geotecnia y Materiales del Campus de Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena. Posteriormente se registraron los datos de deformación como se muestra en el Anexo D, Figura 10.

Figura 10. Banco de Consolidación de los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cartagena. En la imagen se ensayan con 16 kg muestras contaminadas con 3%, 5% y 10% de izquierda a derecha.



Fuente: Autores.

El siguiente paso fue la contaminación de las muestras. Esta contaminación, se realizó como se especificó anteriormente, con cuatro (4) concentraciones distintas de gasolina corriente (3%, 5%, 10% y 12%) utilizando relación peso/peso. Para hacer esto, se vertió el material en probetas de vidrio de 0.4 x 0.4 x 0.5 m, para posteriormente añadir la cantidad correspondiente de gasolina, mezclando hasta obtener una homogeneidad en la mezcla. El contaminante elegido es la gasolina corriente, uno de los tres combustibles líquidos que se comercializa en Colombia, es considerada un combustible básico una mezcla que tiene en

200 y 300 hidrocarburos distintos derivados del petróleo, diseñada como combustible de motor (MINMINAS, 2015).

Según la Resolución 1180 del 21 de junio de 2006 del Ministerio de Minas y Energía, los requisitos de calidad de las gasolinas básicas exigen que la gasolina corriente tenga entre otras características, un índice antidetonante mínimo de 81, un punto de ebullición máximo de 225°C. La gasolina se obtuvo de la estación de servicio Terpel, ubicada en la Avenida Pedro de Heredia (Calle 31ª) con carrera 49. A cada una de las muestras contaminadas se les sometió a ensayos para determinar sus propiedades mecánicas. Estos ensayos fueron:

- Proctor modificado (Norma INV-E 142-07)
- CBR (Norma INV-E 148-07)
- Ensayo de Corte directo (Norma INV-E 154-07)
- Consolidación unidimensional (Norma INV-E 151-07)

Con cada muestra (de diferentes concentraciones), se realizó el mismo procedimiento llevado a cabo con el espécimen sin contaminar para estimar los datos mecánicos y así se logró establecer cuantitativamente las relaciones existentes entre el porcentaje de contaminante y cada propiedad analizada.

5.2. RELACIÓN ENTRE VARIABLES ESTUDIADAS

Con los datos obtenidos hasta esta etapa, se realizó el primer análisis y se obtuvieron los primeros productos de la investigación: gráficas que muestran las variaciones de cada uno de los parámetros obtenidos, con respecto a la concentración; es decir: gráfica de densidad de compactación vs porcentaje de gasolina, humedad de compactación vs porcentaje de gasolina, ángulo de fricción interno vs porcentaje de gasolina, CBR vs porcentaje de gasolina, cohesión vs porcentaje de gasolina, e índices de consolidación vs porcentajes de gasolina. Estas gráficas permitieron visualizar qué tanto impacto tubo la gasolina como contaminante en el suelo como material de construcción.

Para la elaboración de las gráficas antes mencionadas, se organizó toda la información obtenida, y se procedió a cuantificar las desviaciones. Mediante el uso de la hoja de cálculo de Excel se trazaron gráficos que mostraron la influencia de la gasolina como contaminante en cada uno de los parámetros mecánicos de suelo, con el fin de establecer cuantitativamente la variación de cada parámetro de la mecánica de suelos (mediante razones matemáticas, como se mostrará en la parte de discusión y resultados) correspondiente a cada concentración con respecto a los datos medidos para la muestra natural, es decir, sin contaminar, expresando para ello dichas variaciones en porcentaje con respecto a los valores para los parámetros encontrados en la muestra sin contaminar. Ahora bien, los puntos utilizados para este fin serían los valores de los parámetros mecánicos para cada uno de los porcentajes de gasolina. La cantidad de puntos obtenidos en los ensayos para cada parámetro se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Número de puntos obtenidos para cada parámetro.

Parámetro	# puntos
Humedad óptima	5
Densidad máxima	5
Relación de soporte del suelo	5
Ángulo de fricción interno	6
Cohesión	6
Coefficiente de consolidación	5
Total	32

Todo el procedimiento anterior proporcionó una idea de cuánto es la influencia de la gasolina como contaminante en el comportamiento mecánico del suelo, en función de la concentración del mencionado hidrocarburo.

5.3 IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE ESTABILIZACIÓN, USANDO LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTABILIZANTES (CAL, CEMENTO Y ASFALTO)

Este objetivo comprendió el desarrollo de la segunda etapa de la investigación, que inició con la estabilización de las muestras. Por la limitante de tiempo, se decidió que el proceso de estabilización se llevaría a cabo únicamente en la muestra que presentó el comportamiento

mecánico crítico. Inicialmente se propuso elegir como muestra más crítica a la que tuviera mayor desviación con la muestra patrón; es decir, se calcularon las desviaciones que se obtuvieron para cada uno de sus parámetros con respecto a la muestra patrón; estas desviaciones se promediaron y, al final, la muestra con el mayor porcentaje de desviaciones se elegiría como la muestra de comportamiento mecánico crítico. Sin embargo, al obtener los resultados, las concentraciones de 10 y 12% fueron las que mayores desviaciones presentaron, con valores de 68 y 62% respectivamente. Finalmente, los ensayos de estabilización se realizaron con un 12% de gasolina. Y es que, a pesar de que su desviación es menor que la de 10%, el número de parámetros desfavorables es mayor para el 12% que para un 10% de gasolina, esto lo coloca como una proporción crítica, debido a la disparidad en los datos calculados de dichas desviaciones, que hacían a parámetros como CBR y ángulo de fricción tener un mayor peso en el promedio. En otras palabras el criterio de elección considerado, fue la muestra que presentara mayor cantidad de parámetros desfavorables.

A esta muestra se le aplicaron distintos métodos de estabilización, usando las tres sustancias propuestas por la teoría (cal, cemento y asfalto) (Fonseca, Ingeniería de Pavimento para Carreteras, 2002). El proceso de estabilización se llevó a cabo de la siguiente manera: una vez seleccionada la muestra con el comportamiento mecánico crítico, se prepararon seis (6) partes de material, se contaminaron con la concentración de gasolina que produce el comportamiento mecánico crítico, y se aplicó la estabilización (a través de mezclado manual) con los tres (3) estabilizantes propuestos (cal, cemento, asfalto), usando dos (2) concentraciones de cada material 10% y 20%, con lo que se obtuvieron seis muestras estabilizadas. El proceso fue el mismo que se utilizó al contaminar; se aplicó el estabilizante y se mezcló hasta obtener homogeneidad. Una vez realizado esto, a cada muestra estabilizada se le aplicaron los ensayos para determinar su comportamiento mecánico. Esos ensayos fueron:

- Proctor modificado (Norma INV-E 142-07).
- CBR (Norma INV_E 148-07). (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2007)
- Ensayo de Corte directo (Norma INV-E 154-07)
- Consolidación unidimensional (Norma INV-E 151-07)

Para determinar cuál agente estabilizante fue el mejor, y qué porcentaje de este fue el idóneo, se calcularon las medias de las desviaciones de cada una de las muestras estabilizadas con respecto a la muestra contaminada de comportamiento crítico; es decir, se tomaron las muestras estabilizadas, se calcularon las desviaciones de cada uno de sus parámetros con respecto a la muestra de comportamiento crítico y se promediaron dichas desviaciones. Esto se repitió con las seis muestras estabilizadas y, aquella que resultó con la mayor media de desviaciones se seleccionó como la muestra que poseyó el estabilizante idóneo para esta situación, y qué porcentaje de éste aproximadamente. El número de ensayos realizados a lo largo de todo el estudio se refleja en la Tabla 7. Adicionalmente, la Tabla 8 resume las variables que intervienen en este estudio.

Tabla 7. Cantidad de ensayos a que se hicieron durante la investigación por etapas.

Ensayo	ETAPA 1		ETAPA 2	Total
	Fase 1: muestra sin contaminar	Fase 2: muestras contaminadas	Fase 3: muestras estabilizadas	
Proctor modificado	1	4	6	11
CBR	1	4	6	11
Corte directo	1	4	6	11
Consolidación	1	4	6	11

Fuente: Autores.

Tabla 8. Variables que intervienen en el estudio.

Variable	Tipo variable	Ensayo donde se obtiene
Proporción de gasolina	Independiente	-
Proporción de estabilizante	Independiente	-
Humedad óptima	Dependiente	Proctor modificado
Densidad máxima	Dependiente	Proctor modificado
Relación de soporte del suelo	Dependiente	CBR
Ángulo de fricción interno	Dependiente	Corte directo
Cohesión	Dependiente	Corte directo
Coefficiente de consolidación	Dependiente	Consolidación

Fuente: Autores.

5.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Inicialmente, se planteó establecer las regresiones que permitieran conocer los valores para cada uno de los parámetros estudiados a partir de una concentración de gasolina conocida; mediante el uso del método de los mínimos cuadrados, ayudados con la hoja de cálculo de Excel. Sin embargo, al obtener las regresiones se encontró que para los puntos obtenidos en parámetros como CBR, ángulo de fricción, cohesión y los parámetros obtenidos para consolidación, los polinomios que mejor se ajustaron podían establecer valores poco fiables; esto puede deberse a la gran cantidad de variables que intervienen en el más complejo de los materiales de construcción, el suelo. Por lo anterior para estos parámetros se establecieron gráficos comparativos para poder realizar un buen análisis.

La comparación de datos obtenidos entre los tipos de muestra (contaminada y sin contaminar) fue la técnica de análisis (comparación) que predominó en este estudio, porque solo a través de ella se llegó a establecer porcentualmente las variaciones de cada propiedad para cada concentración. Para establecer las variaciones encontradas en las muestras contaminadas, se graficaron los distintos parámetros mecánicos en función del porcentaje de gasolina; esto fue: CBR vs proporción de gasolina, humedad óptima vs proporción de gasolina, ángulo de fricción interno vs proporción de gasolina, ente otras. Estas gráficas permitieron una mejor visualización de la afectación que provocó la gasolina en el suelo, a la vez que facilitaron la selección de la muestra con la proporción crítica de gasolina, la cual fue usada en la siguiente fase del estudio, que fue la de estabilización. Luego de aplicar todos los ensayos correspondientes, y de tabular todos los resultados, se procedió a elaborar los gráficos que permitieron apreciar los cambios en las propiedades producidos por los tres tipos de estabilizantes que se usaron (cemento, cal y asfalto) con lo que se determinó cuál de estos produjo un mejor comportamiento a la muestra de suelo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidos los datos, se procedió a efectuar el análisis de los mismos; los resultados de dicho análisis se presentan a continuación.

Antes de realizar un análisis detallado de cada uno los resultados por ensayos, es importante comentar que inicialmente esta investigación había planteado la contaminación con porcentajes de gasolina mayores, esto es (10%, 25%, 50%, y 75%); sin embargo, fue necesario utilizar porcentajes menores quedando (3%, 5%, 10% y 12%). La investigación contempló en sus inicios, realizar la contaminación de todas las muestras e ir ensayando poco a poco; sin embargo se encontraron dos hechos interesantes, el primero fue que con tan solo un porcentaje de 25%, el material se encontraba en un grado de saturación tal que para la realización de los ensayos de Proctor y CBR las muestras eran totalmente inmanejables; esta condición obligaba a esperar que para cada una de las muestra se diera un procesos de infiltración que tomaba aproximadamente cinco días por muestras, condición que según lo expuesto en el alcance no se analizaría a fondo. El segundo hecho tiene que ver con que una vez realizada la contaminación fue necesario ensayar de forma inmediata para garantizar que los porcentajes de gasolina fueran los establecidos.

Se sabe que la gasolina es un líquido con un bajo punto de ebullición, el cual depende del octanaje, según lo dicho por José Clopatofsky, la página oficial de Ecopetrol indica que la gasolina corriente tiene aproximadamente un octanaje de 81 (EL Tiempo, 2014); si bien no se tiene con certeza el punto de ebullición de la gasolina usada, la bibliografía establece rangos entre unos 25° a unos 225° C de temperatura para esta sustancia, incluso algunos hablen de valores >20°C (ExonMobil, 2013) (CORPONOR, 2015); lo anterior y el hecho de ser altamente volátil explica los cambios en el comportamiento de una misma muestra de suelo al aplicar el mismo ensayo, esto si se tiene en cuenta que la temperatura ambiente promedio de la ciudad sobrepasa los 20°C, lo que provocó que una parte de la gasolina de las muestras que se prepararon se perdieran por evaporación; razón que obligó a la realización de más ensayos de los previsto afectando claramente el cronograma. Se decidió entonces

realizar, para todas las pruebas, los ensayos inmediatamente después de realizada la contaminación; esto con el fin de garantizar que los resultados pudieran ser comparables. Lo anterior permitió ir estableciendo condiciones respecto a casos reales de contaminación, las cuales se expondrán más adelante.

Es importante aclarar que al usar el (12%) como porcentaje de contaminación más alto, no implica que este porcentaje sea el de saturación máxima. Los porcentajes fueron seleccionados teniendo en cuenta la manejabilidad del material a la hora de realizar los ensayos; fue precisamente esta condición la que obligó a cambiar los porcentajes iniciales. Ahora bien, determinar el porcentaje de gasolina que genera la condición máxima de saturación no hace parte del alcance del estudio, sin embargo, es posible determinar el porcentaje de agua que genera la saturación máxima en un suelo, conociendo la gravedad específica y la densidad del suelo, a través de la siguiente expresión:

$$W_{sat} = 100(\gamma_w G_s - \gamma_d) / \gamma_d G_s$$

Para el material de estudio, la condición máxima de saturación se obtiene con un contenido de agua de 11,77%. Lo anterior implicaría que con la humedad que se determinó al inicio ya el suelo se encontraría saturado, sin embargo, supone una contradicción puesto que las pruebas realizadas se hicieron con humedades superiores y el material continuaba absorbiendo los líquidos usados (agua y gasolina), lo que lleva a considerar que posiblemente un porcentaje de material arenoso se saturó en su totalidad pero el componente arcilloso no. Lo expuesto tiene sentido, al considerar que la bibliografía indica que “el punto de saturación de un suelo va de menos del 10% para suelos arenosos, hasta 150% para suelos muy arcillosos y/o con muy alto contenido de materia orgánica” (Flores, 2010).

Siguiendo la metodología estipulada para la etapa 1 de la investigación, que correspondió a la contaminación del suelo y posterior selección de la muestra con el comportamiento crítico, se obtuvieron los siguientes resultados:

6.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Tal como se estableció previamente en la metodología se pudo determinar que uno de los materiales extraídos fue areno-arcilloso, esta clasificación se obtuvo tanto para el método U.S.C.S y ASSTHO, SC y A-2-4 respectivamente, el material posee un porcentaje que pasa por el tamiz No 200 inferior al 35% Tabla 9, valor relevante en la clasificación por el método de la ASSTHO, los valores de límite líquido (LL) y límite plástico (LP) fueron respectivamente 28.17 % y 20.91%, Tabla 10. De acuerdo con la clasificación por U.S.C.S para los valores hallados de LL y LP el suelo clasificaba como una arena; para este método se establecen dos condiciones para la identificación de un suelo en el laboratorio, uno es el porcentaje de fino que pasa el tamiz No. 200 y el otro es el valor del índice de plasticidad. En este punto se encontró que el porcentaje no fue mayor al 12%, lo que clasificaba el suelo como arena mal graduada (Arenas limpias); sin embargo, al calcular el índice de plasticidad (IP) se determinó un valor mayor que 7 ($IP = 7,26$), lo que significó que no se estaba en presencia de una arena limpia, sino que poseía un porcentaje considerable de finos. Esta aparente contradicción se puede explicar en el hecho de que se encontraron grumos en los tamices 3/8" y 1/2". Por lo que el suelo se definió como areno-arcilloso SC Tabla 10, teniendo en cuenta además la clasificación dada por el método ASSTHO.

Tabla 9. Resultados de Granulometría, para el segundo material evaluado.

(Material 2)				
P1 (g)=	1000			Humedad
P2 (g)=	998.60			11.77%
Tamiz No.	W Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum	% Pasa
1 1/2"		0.00	0.0	100.00
1"		0.00	0.0	100.00
3/4"		0.00	0.0	100.00
1/2"	51.50	5.15	5.10	94.85
3/8"	51.12	5.11	10.30	89.74
No. 4	162.04	16.20	26.50	73.54
No. 10	239.56	23.95	50.40	49.59
No. 40	300.25	30.02	80.40	19.56
No. 100	125.83	12.60	93.00	6.98
No. 200	47.79	4.78	97.80	2.20
FONDO	20.51	2.05	99.80	0.15
	998.6	99.85		

Fuente: Autores.

Tabla 10. Característica del material para cada uno de los métodos usados.

(Material 2)		
AASTHO	A-2-4	Grava y arena arcillosa o limosa
USCS	SC	Arena arcillosa

Fuente: Autores.

Se trata entonces de un material mixto, con porcentajes de grano grueso superior a 97.8% con presencia de finos. La humedad natural tomada inmediatamente después de extraído el material fue de 11.7% con una densidad de 1.13 g/cm³, Tabla 11.

Tabla 11. Datos para el cálculo de la densidad del material.

(Material 2)		
Volumen del Recipiente (cm³)	944	DENSIDAD (g/cm³)
Masa (g)	1	1088.00
	2	1050.83
	3	1067.20
PROMEDIO		1.13

Fuente: Autores.

Por otro lado, mediante la realización de los ensayos se determinaron cada uno de los parámetros definidos en la mecánica de suelo, que condicionan sus características. La Tabla 12 resume los resultados hallados por ensayo para cada una de las variables estudiadas, para cada contenido de contaminante, así como la para la muestra patrón.

Tabla 12. Resumen de los valores para cada parámetro mecánico que define las muestras ensayadas.

ENSAYO	PARÁMETROS	(% de Gasolina)				
		Muestra Patrón	3%	5%	10%	12%
Proctor Modificado	Densidad de Compactación (g/cm^3)	1.897	1.889	1.891	1.879	1.856
	Humedad Óptima (%)	10.47	12.03	11.79	14.5	15.41
CBR	CBR (%)	6.40	10.84	17.65	44.40	50.14
Corte Directo	Cohesión (kg/cm^2)	0.621	0.594	0.144	0.170	0.319
	Angulo de Fricción (ϕ)	34.13	33.48	44.87	46.43	40.61
Consolidación	Coefficiente de Consolidación C_{v50} (cm^2/seg)	0.0021	0.0011	0.0021	0.0015	0.00086

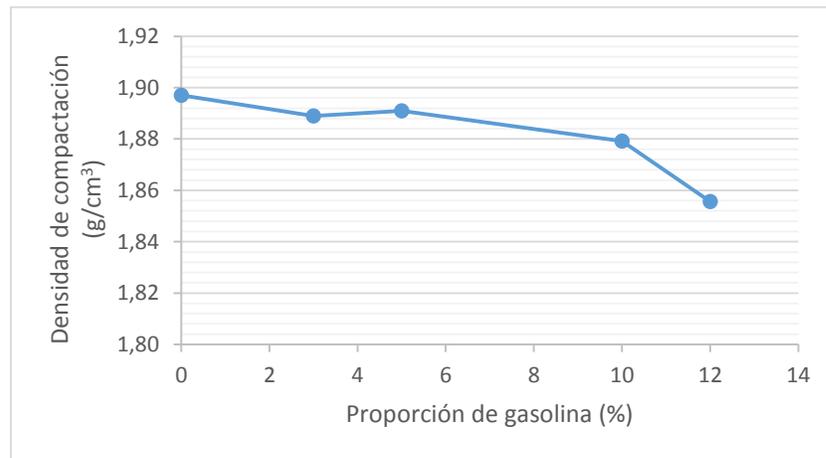
Fuente: Autores.

6.2 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS VARIABLES.

6.2.1 Resultados de ensayo de Proctor Modificado.

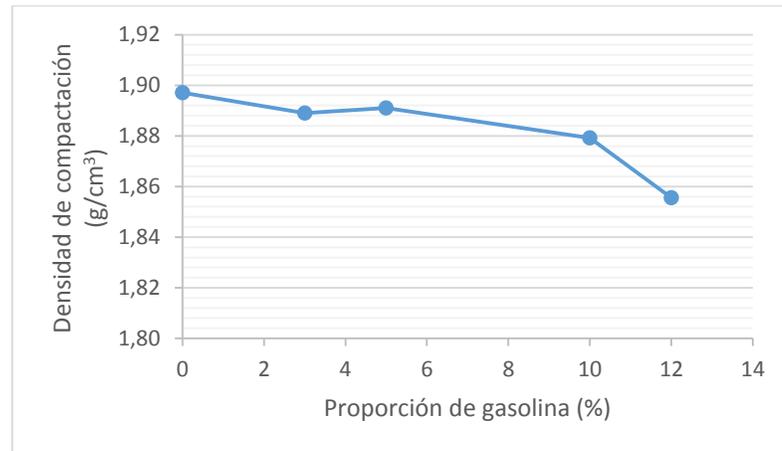
La primera propiedad mecánica estudiada fue la compactación. Mediante la metodología definida en la norma INV-E 142-07, los datos obtenidos se muestran a continuación:

Figura 11. Relación entre la densidad de compactación y la proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

Figura 12. Relación entre la humedad óptima y la proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

Se puede apreciar en la Figura 11, una marcada influencia del contaminante en la densidad de compactación del suelo, al disminuir a medida que el contenido de gasolina se aumenta. Se podría teorizar la causa de esta tendencia a partir del hecho que la gasolina, al poseer una densidad baja, propicie una densidad de material combinado (suelo contaminado con gasolina) menor que el material más denso (suelo), y mayor que el más liviano (gasolina). Lo anterior significa que, para los suelos contaminados con gasolina, una disminución en la densidad repercutiría en la disminución de la resistencia de los mismos. Es importante anotar que la diferencia de densidades entre el agua y la gasolina, hacen que la hidratación de la masa de suelo no sea uniforme, se notó durante los ensayos que al agregar agua al suelo ya contaminado se formaron “capsulas” de material que atrapaba el agua agregada.

Respecto a las humedades naturales de cada muestra (correspondiente a cada uno de los porcentajes de gasolina, Figura 12 se eligieron tres humedades diferentes por muestra, para aplicación del ensayo Proctor. Las altas humedades elegidas en este punto (sobre todo en las proporciones de 10 y 12% de gasolina) hicieron que, al momento de graficar, se obtuvieran sólo las ramas húmedas de las gráficas (la rama derecha) o una parte de ésta (las gráficas obtenidas en cada uno de los ensayos se muestran en el Anexo D). La teoría aporta valores

típicos de humedad de compactación para materiales arenosos entre el 13% y 16%, el bajo contenido de arcilla del material es el causante de que todos los valores no se ubiquen dentro de los rangos, sin embargo son muy aproximados.

Si bien la compactación es por sí sola un método de estabilización de suelo al modificar la relación de vacíos del mismo, a partir de estas gráficas se puede concluir, ciertamente, que la gasolina tiene una influencia marcada en la compactación del suelo areno-arcilloso. La Tabla 14 expresa cuantitativamente esta influencia

Tabla 13. Desviaciones calculadas con respecto a los valores de la muestra sin contaminar.

% gasolina	Humedad Optima	Densidad de Compactación
3	14.90%	0.42%
5	12.61%	0.32%
10	38.49%	0.94%
12	47.18%	2.18%

Fuente: Autores.

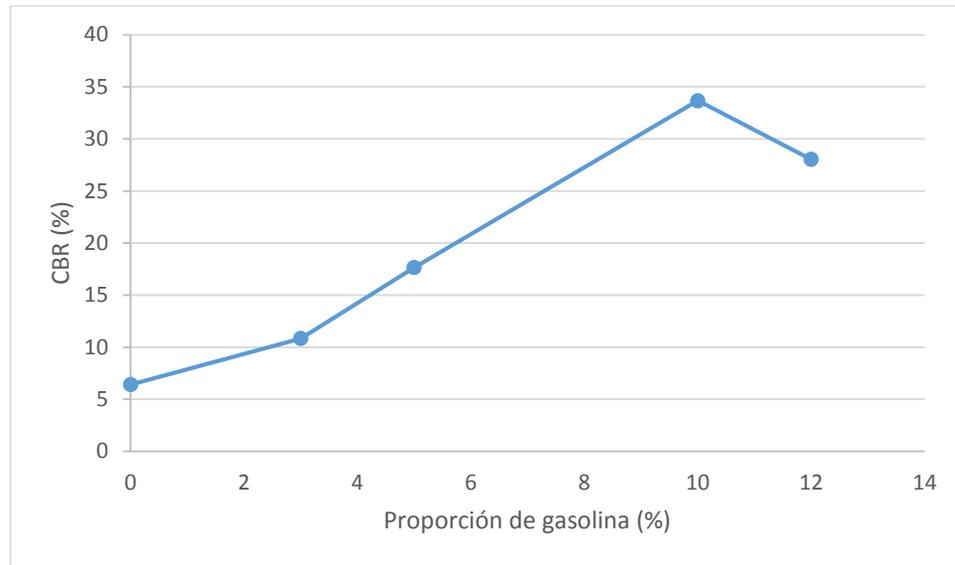
La Tabla 13 se elaboró en base a los datos obtenidos para cada porcentaje, teniendo en cuenta el valor de cada parámetro para la muestra sin contaminar. Es así pues, como la muestra que contiene un 3% de gasolina posee una desviación de 0.42% en la densidad de compactación con respecto al valor de dicho índice en la muestra sin gasolina.

6.2.2 Resultados de ensayos de CBR

Siguiendo con la metodología, se procedió a realizar el ensayo California Bearing Ratio (CBR). Este ensayo se debe realizar luego del ensayo de Proctor modificado, pues los datos obtenidos en este son necesarios para la realización del CBR. Siguiendo con el procedimiento descrito en la norma INV-E 148-07.

La gráfica comparativa entre CBR y proporción de gasolina se presenta a continuación:

Figura 13. Relación entre la relación de soporte del suelo (CBR) y la proporción de gasolina.



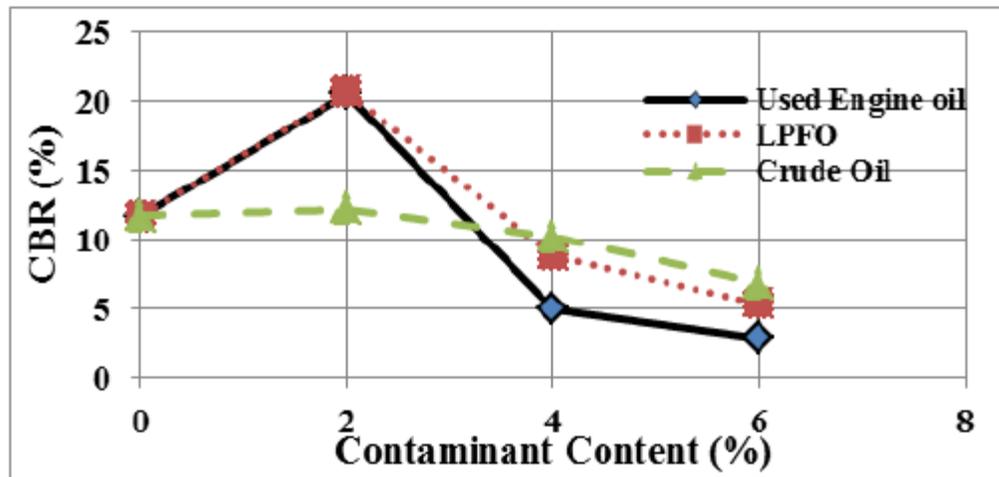
Fuente: Autores.

La Figura 13 marca una tendencia al alza en el valor de CBR a medida que aumenta la proporción de gasolina por debajo de 10%. Contrastando con la disminución de los valores de la densidad de compactación, el aumento del CBR está directamente relacionado con la presencia del contaminante; la diferencia de densidades existentes entre los tres materiales que conforman las muestras (agua, suelo y gasolina), propicia un cambio en la estructura del suelo, puesto que tiende a reagrupar las partículas en pequeñas cápsulas. La gasolina, al ser una sustancia hidrofóbica, separa en pequeños grupos las partículas de arcillas que están saturadas de agua; esta reacción física propicia la aparición de partículas con tamaños aparentemente mayores. *Mohammed et. al (2013)*, en su revisión bibliográfica cita números estudios relacionados en el mundo respecto al tema, uno ellos realizado en 2011 muestra que para suelos arcillosos contaminados con *Motor oil*, se encontró un empaquetamiento de las partículas de suelos (Ashraf, 2011 como cito Mohammed et. al, 2013); otros estudios explican que, en suelos arcillosos (mormorillonita) las partículas tienden a coagularse y comportarse como materiales granulares en presencia de conglomerantes orgánicos (Rehman, 2007 como citó Mohammed et. al, 2013) . Durante la preparación de las probetas

de CBR las muestras son sometidas a procesos de compactación que desintegran parte de dichas cápsulas; es importante anotar que la compactación ya le confiere resistencia a la muestra; adicionalmente las probetas son cargadas con un peso de acuerdo con lo descrito en la normativa. Finalmente, durante la realización de la prueba de penetración, las cápsulas aún sin desintegrar, lo hacen, reduciendo la relación de vacíos de las muestras de suelo mientras los valores de carga se van incrementando. Lo anterior permite obtener como resultado mayores resistencias a la penetración y, por ende, mayor valor de CBR. Es así como un suelo areno-arcilloso al contaminarlo con porcentajes de gasolina entre 5% y 12% puede comportarse como gravas, arenas bien graduadas, gravas arcillosas e incluso gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con pocos finos o sin ellos, arrojando valores de CBR superiores a 30% inclusive. El aumento en los valores de este parámetro se explicó como un cambio físico, dado que esta investigación no contempló pruebas químicas, las cuales sería recomendable analizar, teniendo en cuenta el comportamiento químico de las arcillas; y considerando además los resultados del estudio realizado por *Ocampo et. al (2010)*, donde se encontró que para muestras de suelo conformadas principalmente por cuarzo, caolinita y moscovita, se observaron cambios en las proporciones relativas de los minerales debido a la heterogeneidad del suelo al ser contaminado y no se encontró formación de minerales nuevos, es decir que el contaminante, que en este caso fue gasolina, no ocasionó cambios químicos ni mineralógicos en las muestras de suelo.

Mohammed et. al (2013), muestra la relación entre la cantidad de gasolina y el CBR para diferentes tipos de contaminantes, todos hidrocarburos en un suelo arenoso, siendo este tipo de suelo que presenta mayor similitud con el usado en este estudio.

Figura 14. Porcentaje de contaminante vs CBR.

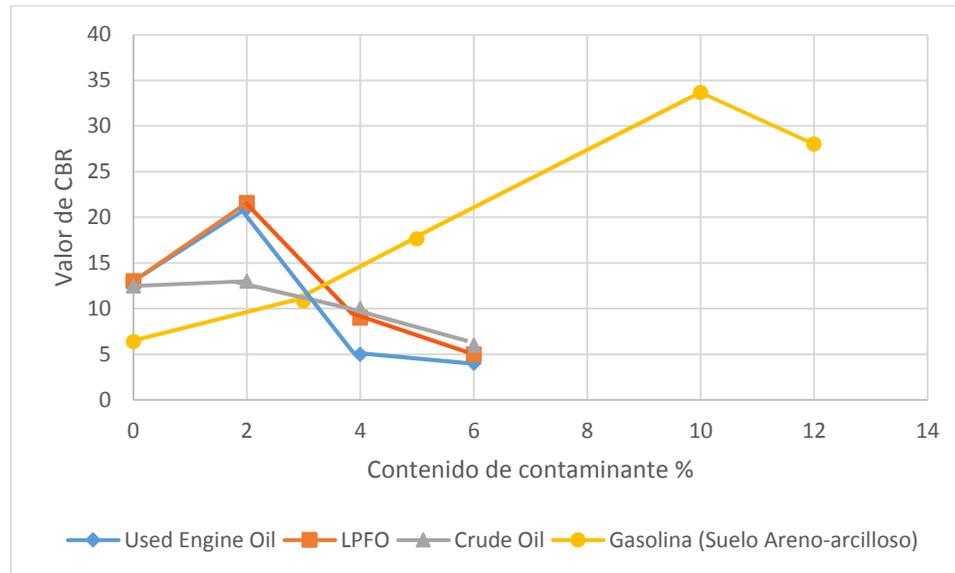


Fuente: Tomado de documento “Effects of Crude Oil, Low Point Pour Fuel Oil and Vacuum Gas Oil Contamination on the Geotechnical Properties Sand, Clay and Laterite Soils (Mohammed & Abdullahi, 2013).

La Figura 14, muestra como para cada uno de los hidrocarburos utilizados existe un porcentaje de máximo valor para CBR, que en el caso del estudio anteriormente mencionado fue el 2%, si bien hay que tener en cuenta que no se está ante el mismo tipo de suelo y los contaminantes usados en este estudio tienen como característica principal ser de mayor viscosidad que la gasolina, al comparar las tendencias se encontró que para todos los hidrocarburos aplicados en suelos arenosos existe un punto donde se encuentra el mayor valor para CBR. Se puede decir entonces que la viscosidad es un parámetro que controla este porcentaje de contenido de contaminante para un valor máximo de CBR, tal como lo muestra la Figura 15.

Este parámetro es especialmente importante en el proceso constructivo de pavimentos, por lo cual tiene un especial tratamiento en el presente trabajo.

Figura 15. Contenido de contaminante vs CBR.



Fuente: Autores.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimento de Colombia, al evaluar la calidad de un material para ser usado como subrasante, para los valores de CBR inferiores a 2% se requiere estabilizar el suelo, sin embargo, según los resultados obtenidos, el material usado sin haber estado contaminado puede ser usado como material de subrasante, clasificándose como un material S3 con módulo resiliente entre 500-1000 kg/cm². Para las muestras contaminadas se tiene que, al ser los valores de CBR mayores a medida que aumenta el contenido de gasolina (tendencia que se mantiene hasta un 10% del contaminante), el suelo según el Manual de Diseño sería S4 para los valores entre 10-20% y S5 para valores mayores 20%, como es el caso de las dos últimas muestras (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2008).

Por otra parte, la literatura establece unos valores mínimos de CBR para los materiales que pretenden ser utilizados como base y subbase; para base el mínimo valor es de 80%, mientras que para sub-base es de 30% para materiales granulares, como es el caso del material estudiado. Cuando no se cumple con estos requisitos se realiza una estabilización. Se tiene entonces que, para aquellos materiales que se usarán como base y sub-base, serán mejorados

con emulsión asfáltica. El valor mínimo de CBR está entre un 15%- 20%; para base y sub-base tratada con cemento entre un 60%-80%. Lo anterior significa que las muestras de suelo con los contenidos de gasolina estudiados pueden ser usadas como base y sub-base puesto que cumplen el requerimiento mínimo para ser estabilizadas con emulsión asfáltica, para desarrollar la resistencia especificada para estas capas de pavimento (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS, 2012).

Se concluye entonces que se puede recomendar la utilización de suelo contaminado con gasolina en la construcción de pavimentos para porcentajes de contaminante inferiores al 10% lo que concuerda con los resultados del estudio *“Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction*, donde se hace la misma recomendación. La Tabla 14 muestra las desviaciones de este parámetro respecto a la muestra patrón.

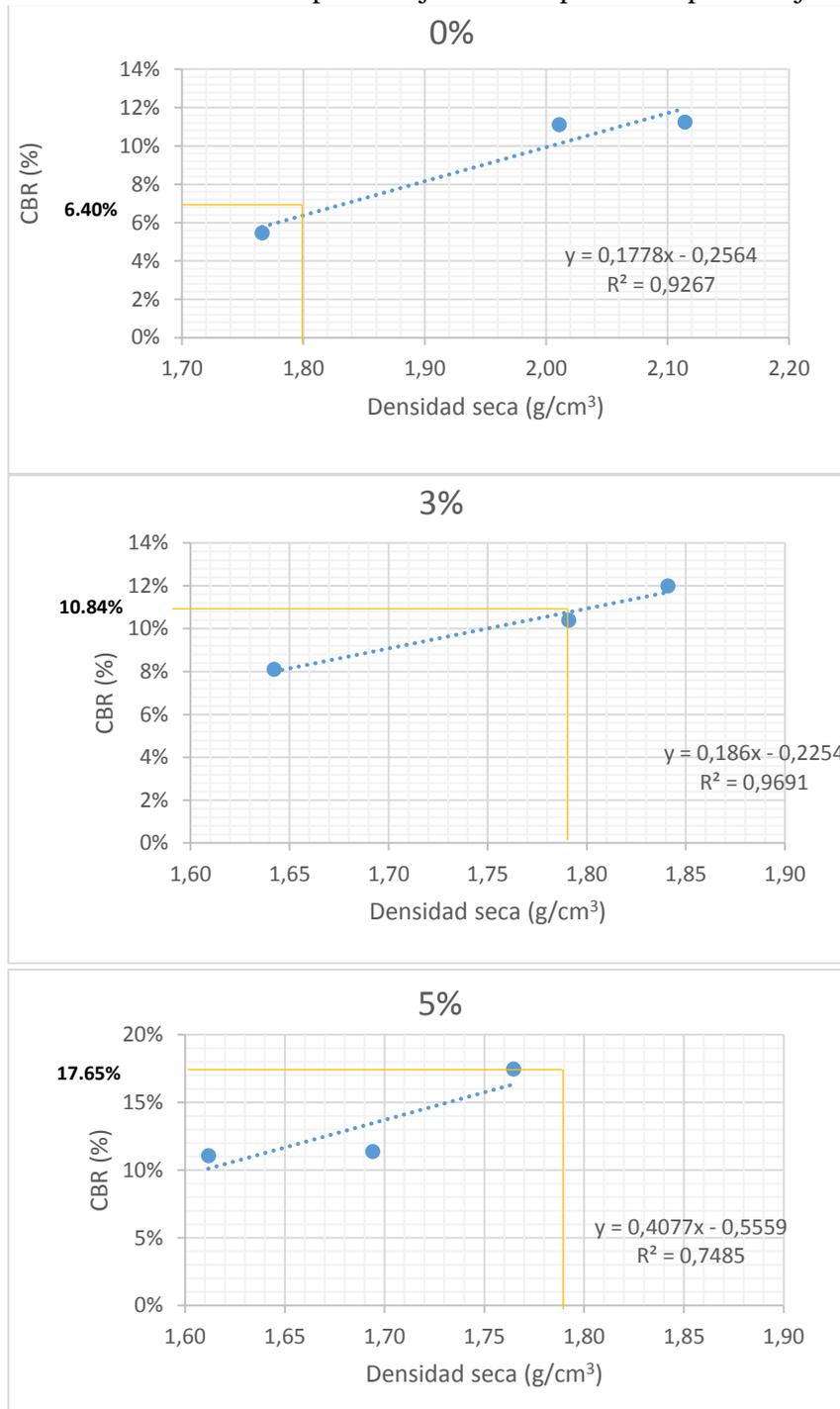
Tabla 14. Desviaciones calculadas con respecto a los valores de la muestra sin contaminar.

%gasolina	CBR (%)
3	69.38%
5	175.78%
10	426.10%
12	338.10%

Fuente: Autores.

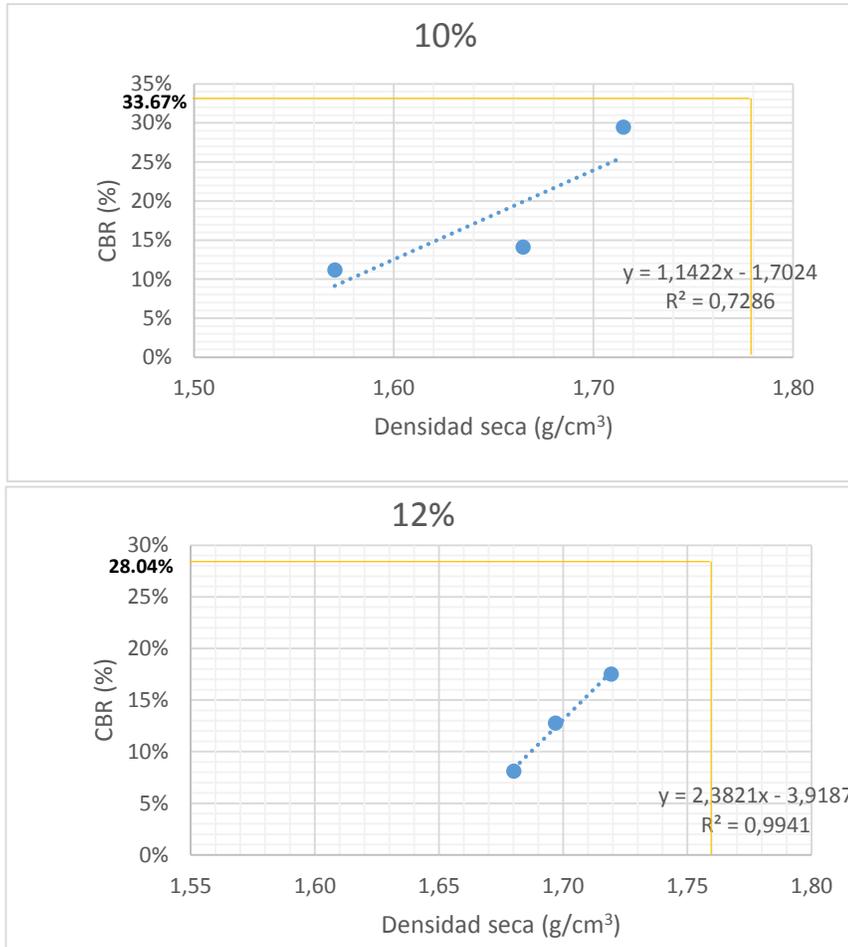
La Figura 16 muestra la relación entre las concentraciones de gasolina y la densidad de seca, las gráficas permiten establecer la ecuación de la recta con la cual se determinan el CBR para el 95% del Proctor modificado. Adicionalmente, se presentan los gráficos teóricos de CBR de acuerdo con el número de golpes, para cada uno de los porcentajes de gasolina analizados, Figura 17.

Figura 16. Densidad seca vs porcentaje de CBR para cada porcentaje de gasolina.



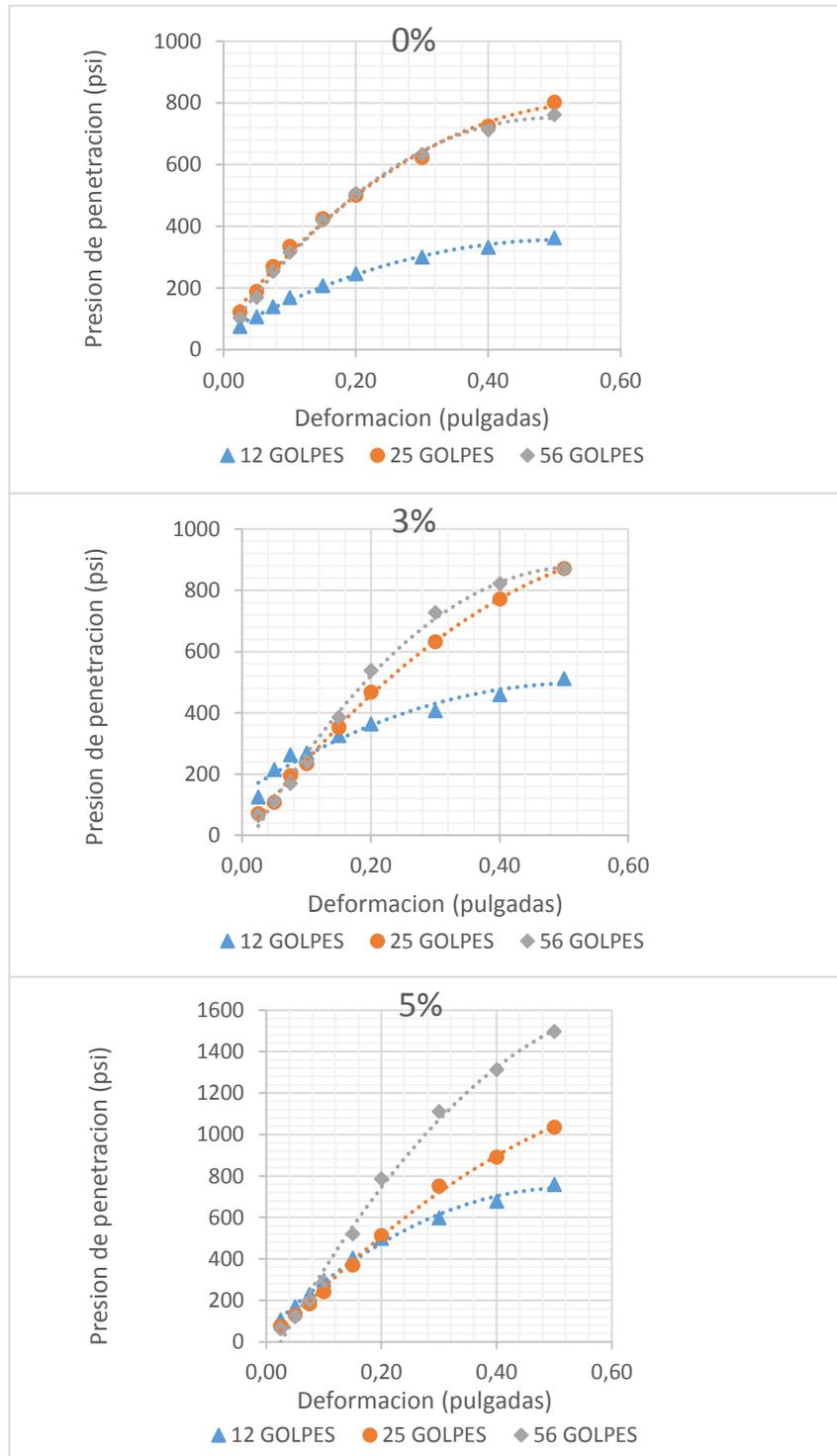
Fuente: Autores.

Figura 16. Densidad seca vs porcentaje de CBR para cada porcentaje de gasolina (continuación).



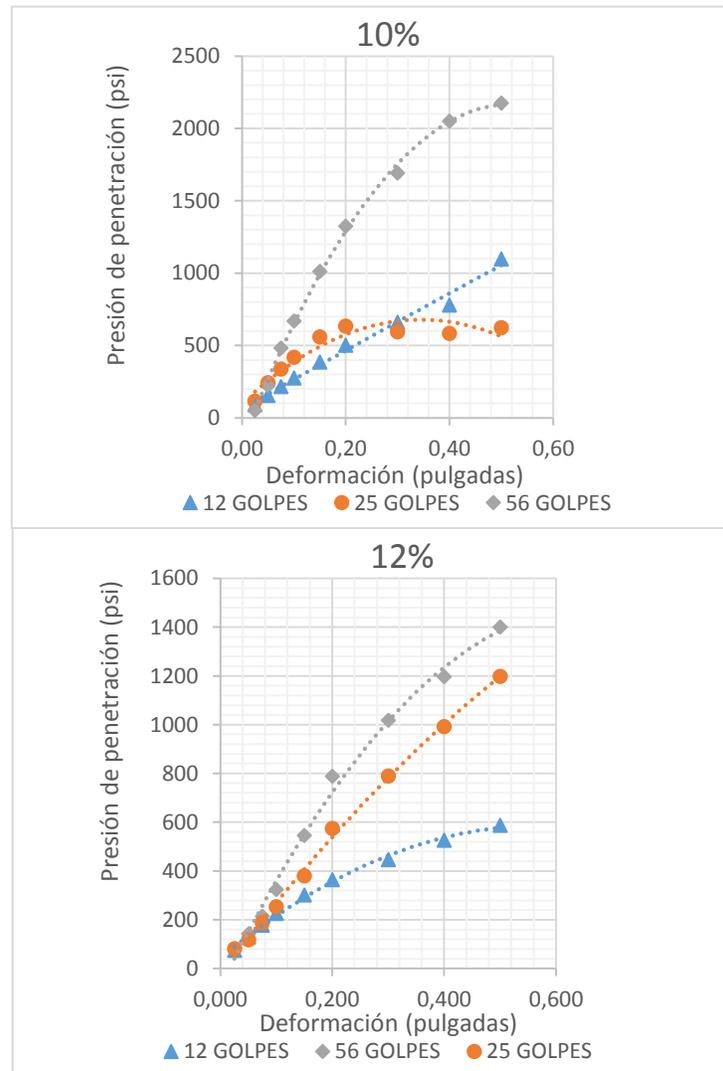
Fuente: Autores.

Figura 17. Grafica representativa del ensayo de CBR, Presión de Penetración vs Deformación para cada número de golpes.



Fuente: Autores.

Figura 17. Grafica representativa del ensayo de CBR, Presión de Penetración vs Deformación para cada número de golpes (continuación).

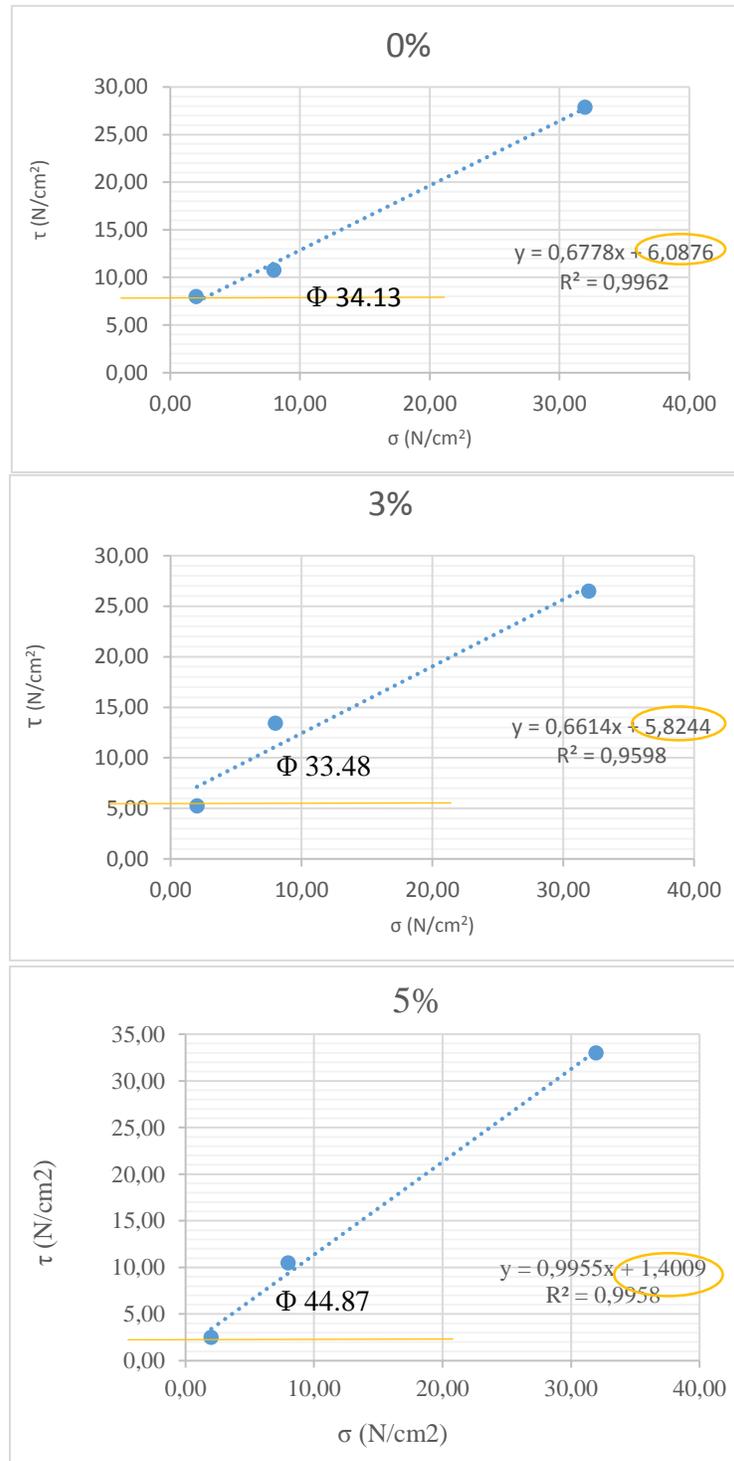


Fuente: Autores.

6.2.3 Resultados de ensayo de Corte Directo.

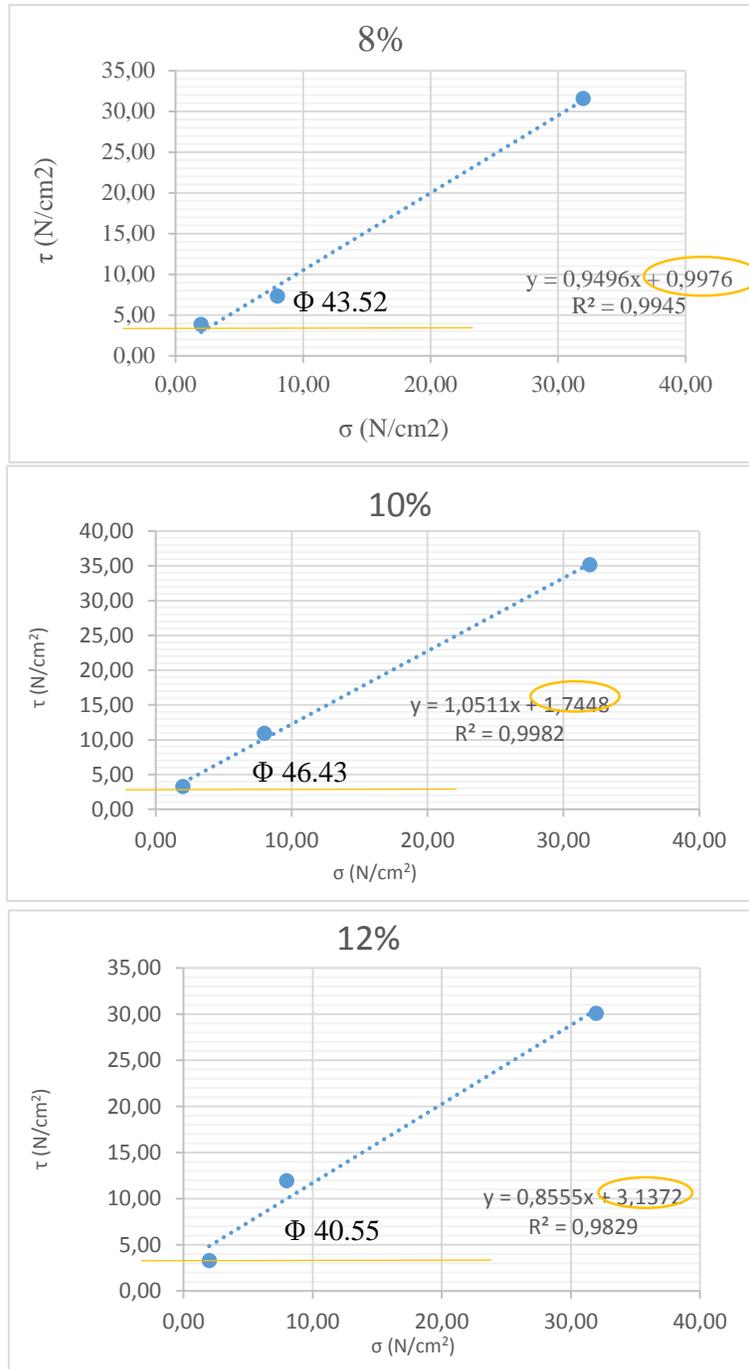
Referente a los ensayos de corte directo, siguiendo la norma INV-E 154-07, se puede observar gráficamente la relación entre los diferentes porcentajes de gasolina y el ángulo de fricción y la cohesión. La Figura 18 muestra los gráficos de Esfuerzo cortante vs Esfuerzo normal, que permitieron obtener los valores de ángulo de fricción y cohesión.

Figura 18. Esfuerzo Cortante vs Esfuerzo Normal. Determinación del ángulo de fricción y la cohesión del suelo para cada porcentaje de gasolina



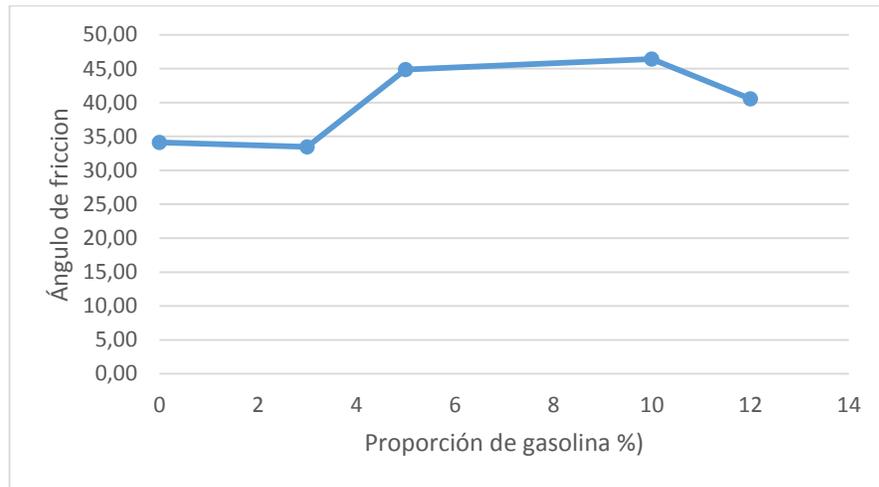
Fuente: Autores.

Figura 18. Esfuerzo Cortante vs Esfuerzo Normal. Determinación del ángulo de fricción y la cohesión del suelo para cada porcentaje de gasolina (continuación).



Fuente: Autores.

Figura 19. Relación entre el ángulo de fricción y la proporción de gasolina.

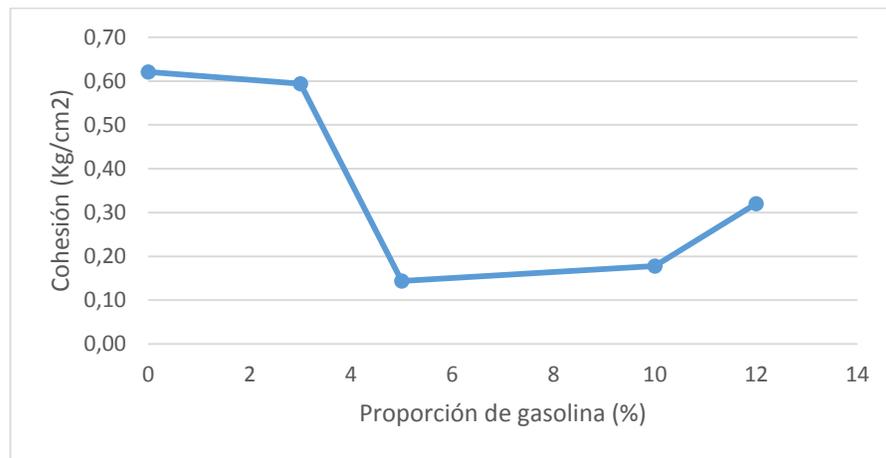


Fuente: Autores.

El ángulo de fricción y la cohesión son los parámetros que determinan la resistencia al cortante del suelo; por esto es notable observar el aumento del ángulo de fricción de las muestras contaminadas con gasolina, respecto a la muestra inalterada, Figura 18. Al evaluar este parámetro no existe una tendencia definida, puesto que la regresión que mejor se ajustó fue la de un polinomio de grado 5; en el estudio realizado por Galindo, N. et. al (2012), los ensayos de corte directo muestran un comportamiento similar para este parámetro, es decir, no existe una tendencia definida, pero todos los valores para el ángulo de fricción de las distintas concentraciones del contaminante son mayores respecto a la muestra sin contaminar. Si bien, no se puede realizar una comparación directa respecto a las variaciones porcentuales del ángulo de fricción debido a que no se trata del mismo tipo de suelo ni de contaminante, el hecho de que la gasolina sea un derivado del petróleo, permite establecer al menos un paralelo entre las tendencias, dejando claro que el hidrocarburo en ambos casos provoca un aumento en este parámetro (Galindo & Rueda, 2012). Es importante mencionar que, en este mismo estudio, los resultados mostraron una disminución en el ángulo de fricción interna de los suelos contaminados para las mayores concentraciones de crudo, lo cual se justificó con el encapsulamiento o solidificación del suelo causada por el contaminante. Hay que tener en cuenta que, el suelo estudiado en la presente investigación es en su mayoría granular, por lo

que se espera que los valores de permeabilidad sean considerablemente altos en comparación al suelo arcilloso estudiado en la investigación citada. De realizarse nuevas pruebas con mayores porcentajes de contaminante, probablemente parte de la gasolina añadida (sobre todo, nuevamente, en los porcentajes mayores) saldría de la muestra y, al quedar un poco menos saturadas, los valores del ángulo de fricción podrían disminuir. Por lo anterior, es recomendable realizar ensayos de corte directo con mayores concentraciones para verificar esta tendencia.

Figura 20. Relación entre la cohesión y la proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

Ahora bien, el hecho de que la gasolina sea una sustancia hidrofóbica propicia la formación de flóculos; al no existir una mezcla homogénea entre el agua y la gasolina, las partículas higroscópicas de la arcilla forman “capsulas” que al ser de mayor tamaño favorecen el aumento en el ángulo de fricción. Por otro lado, la gasolina al ser hidrofóbica impide la cohesión entre dichos flóculos al romper la doble capa eléctrica formada por moléculas de agua rodeando las partículas de arcilla, lo que se ve reflejado en la disminución de los valores de la cohesión para las distintas concentraciones, respecto a la muestra inalterada, Figura 20 (Ocampo, Hernandez, Valencia , & Echeverri , 2010). De la misma forma como ocurrió con

el ángulo de fricción, el gráfico cohesión vs porcentaje de gasolina no muestra una tendencia, esto mismo ocurre en el estudio anteriormente mencionado, realizado para un suelo arcilloso contaminado con petróleo

Como se mencionó anteriormente, existe una relación proporcional entre la densidad de un suelo y el valor del CBR, por lo que el aumento en los valores del mismo no estaría justificados. El incremento en el ángulo de fricción puede ser la razón del aumento del CBR con el mismo contaminante; Alvarado & Muñoz (2010) establecieron una correlación entre estos dos parámetros mediante ensayos para un suelo areno limoso, encontrando que, a media que aumentaba el ángulo de fricción, el valor de CBR también lo hacía de forma simultánea, alcanzando un valor de CBR máximo de 97,3% para un ángulo de fricción de 43°, siendo la regresión asintótica para este último valor.

Se observa pues (Figura 19), que, al incrementar la cantidad de gasolina, existe un aumento importante en los valores de ángulo de fricción, si bien no se puede decir que la relación es directamente proporcional, una vez más se observan comportamientos diferenciados para el 5 y 10% de gasolina, donde se muestran los mayores valores. Para la cohesión resulta contrario, los valores todos disminuyen al compararlos con la muestra patrón, teniendo como porcentajes más desfavorables 5% y 10%, esta disminución se presenta porque a diferencia de la muestra natural, al mezclar con gasolina, por la diferencia de densidades entre ambos líquidos, todas las partículas no se encuentran hidratadas.

Por el otro lado, la cohesión disminuye sustancialmente. Es de anotar que, una vez mezclado el suelo con los porcentajes trabajados de (3%,5%, 10% y 12%), y dependiendo de la cantidad de material, el suelo tenía una apariencia muy seca y suelta. Tanto que, al realizar la gráfica de regresión planteadas inicialmente, esta cruzó el eje x, adquiriendo valores negativos de cohesión. Para corregir esta situación, la medida tomada fue realizar un punto adicional para la curva en el intervalo donde ésta toma valores negativos. Ese punto se tomó al 8% de concentración de gasolina. Los resultados se muestran en la Tabla

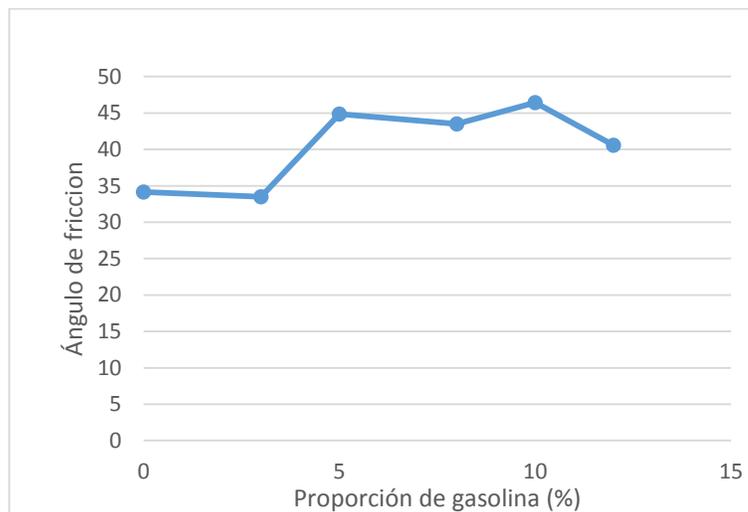
Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de corte directo.

% gasolina	Ángulo de fricción (Φ)	Cohesión (kg/cm^2)
0	34.13	0.621
3	33.48	0.594
5	44.87	0.144
8	43.52	0.102
10	46.43	0.178
12	40.55	0.32

Fuente: Autores.

Con estos datos, se construyó nuevamente las curvas de ángulo de fricción vs porcentaje de gasolina, Figura 21 y cohesión vs porcentaje de gasolina, Figura 22.

Figura 21. Relación entre el ángulo de fricción y la proporción de gasolina.

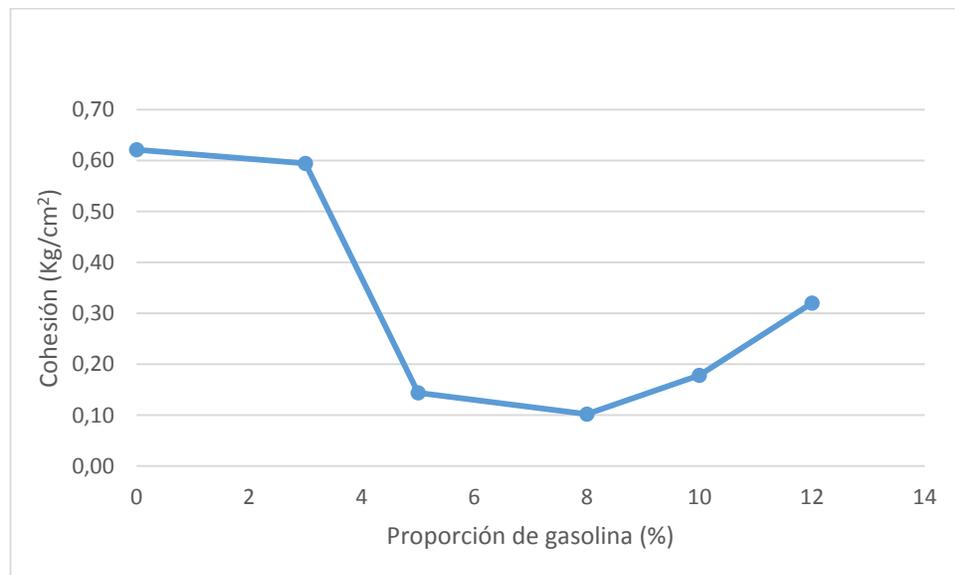


Fuente: Autores.

Al realizar el ajuste de las curvas y establecer las regresiones a través de la hoja de cálculo de Excel, se encontró que nuevamente, sólo un polinomio de grado 5 ajustó los datos, Figura 21. Este fenómeno puede tener su explicación en la preparación de los especímenes

ensayados, puesto que esta prueba con frecuencia se aplica a muestras inalteradas de suelo, condición que no se pudo garantizar debido a la contaminación controlada en laboratorio. El ensayo es muy sensible, y las pequeñas diferencias en la preparación de uno u otro cilindro para ensayo pudieron influir en los datos a la hora de mostrar tendencias definidas; sin embargo, la propensión que posee es que, con el aumento de la gasolina, se aumenta el ángulo de fricción interno, bajo ningún patrón constante.

Figura 22. Relación entre la cohesión y la proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

La observación para la cohesión es similar a la realizada para el ángulo de fricción. Si se mostrara como una regresión, se encontraría que, solo un polinomio grado 5 ajustaría los datos (Figura 22), estableciendo valores máximos y mínimos poco fiables y el porqué de esto podría explicarse de la misma manera. El proceso de preparación de la muestra a ensayar pudo arrojar ciertas diferencias entre cilindro y cilindro, más allá de la diferencia en la concentración de gasolina. Lo cual, en el ensayo de corte directo, por ser un ensayo delicado, causó cierta dispersión en los datos. En el estudio realizado por Galindo & Rueda,

la similitud con la tendencia mostrada en la Figura 22 es evidente; ambas graficas muestran una disminución para las primeras concentraciones; mientras que para los valores más altos de concentraciones la tendencia muestra un ligero aumento. Como conclusión se puede anotar que, definitivamente, los hidrocarburos (crudo, gasolina) poseen un impacto negativo sobre la cohesión del suelo.

Vale la aclaración de que el porcentaje de 8% fue utilizado sólo en el ensayo de corte directo. Este dato será representativo al momento de hacer el análisis sólo en el ensayo de corte directo.

6.2.4 Resultados de ensayo de Consolidación

Es necesario precisar que, para el ensayo de consolidación, las muestras se toman inalteradas; sin embargo, y acorde con lo que se especificó en la metodología, para esta investigación las pruebas se realizaron para muestras alteradas, debido a que la contaminación del suelo se llevó a cabo en laboratorio. Por tal razón se tomó una muestra de suelo y se remoldeó; es decir, la muestra se llevó a la densidad del suelo contenida en el volumen estándar del anillo del banco de consolidación, Tabla Para la preparación de la probeta a ensayar se tuvo en cuenta lo siguiente:

Tabla 16. Consideraciones para preparación de las muestras a ensayar.

Densidad (g/cm ³)	1.13
Diámetro del anillo (cm)	5.00
Altura del anillo (cm)	2.00
Sección del anillo (cm ²)	19.63
Volumen del anillo	39.27
Masa del material (g)	44.37
Profundidad a la que se tomó la muestra (cm)	140.00
Presión del material en el terreno (kg/m ²)	1582.00
Humedad del material	11.77%
Volumen de agua (ml)	5.22

Fuente: Autores.

Dado que el objetivo principal del estudio era establecer las variaciones provocadas en las propiedades mecánicas que determinan los procesos de consolidación de un suelo arenoso-arcilloso, al estar este contaminado con diferentes porcentajes de gasolina, se remoldearon en laboratorio, muestras de suelo bajo las condiciones anteriormente descritas. Para iniciar, se calcularon las presiones a las cuales se sometería el suelo durante el ensayo, Tabla 17.

Tabla 17. Presiones calculadas para el ensayo de consolidación en laboratorio.

Presiones (kg/cm²)	Cargas (kg)	Redondeo (kg)
0,2	3,928	4.00
0,4	7,856	8.00
0,8	15,712	16.00
1,6	31,424	32.00
3,2	62,848	64.00

Fuente: Autores.

Para los cálculos requeridos en el presente ensayo, fue necesario calcular la gravedad específica de cada uno de los especímenes de suelo, tanto sin contaminar como contaminados. Estos datos se presentan en la Tabla 18:

Tabla 18. Gravedades específicas de cada uno de los especímenes utilizados en este estudio. (Los datos y cálculos relacionados con esta tabla se presentan en los anexos).

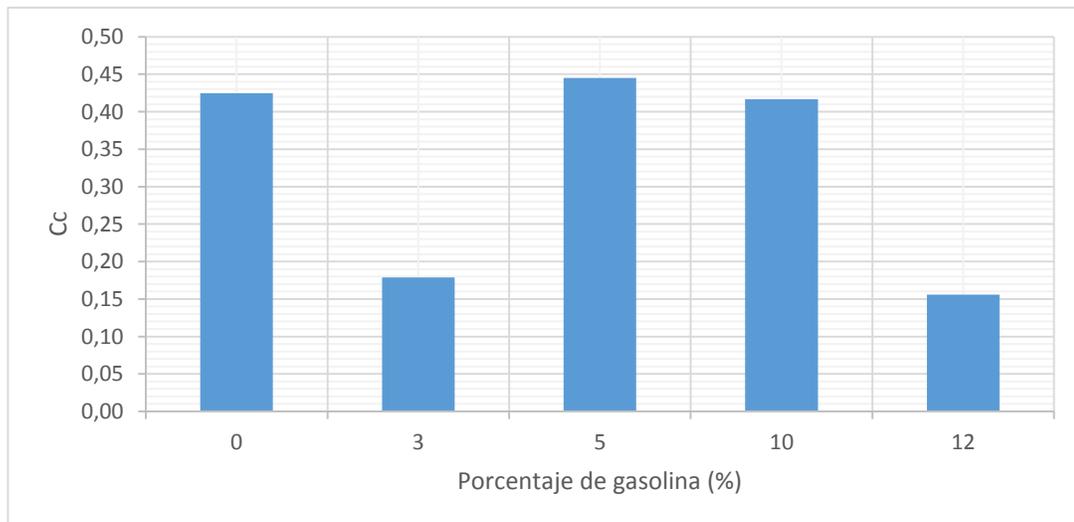
% gasolina	Gs
0	2,650
3	2,536
5	2,569
10	2,553
12	2,546

Fuente: Autores.

La teoría maneja valores típicos de gravedad específica según los tipos de suelo, para suelos arenos arcillosos los valores establecidos están en el orden de 2,67 (Djoenaidi, 1985), muy próximo al valor obtenido para el suelo ensayado; ahora bien, al comparar los valores obtenidos para las muestras ensayadas con el de la muestra patrón, se observa claramente que la presencia del contaminante disminuye los valores de gravedad específica en un rango entre 2,53-2,57; este cambio resulta significativo a la hora de evaluar otro dato importante de la consolidación como lo es la relación de vacíos, dado que, al disminuir los valores de gravedad específica, ésta aumenta, haciendo más proclive al suelo a ceder bajo la acción de una carga.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, y siguiendo las pautas establecidas en la norma INV-E-151, se obtuvieron los siguientes cuadros comparativos. Es de resaltar que, dada la eminente complejidad del ensayo y el análisis de las características del suelo en sí, no se puede evaluar la consolidación mediante un solo parámetro, sino que se da a través de la conjugación de varios índices. La Figura 23 muestra la variación en el índice de compresibilidad para cada uno de los porcentajes de gasolina analizados; mientras que la Figura 24, establece la relación exteniente entre la cantidad de gasolina y la relación de vacíos.

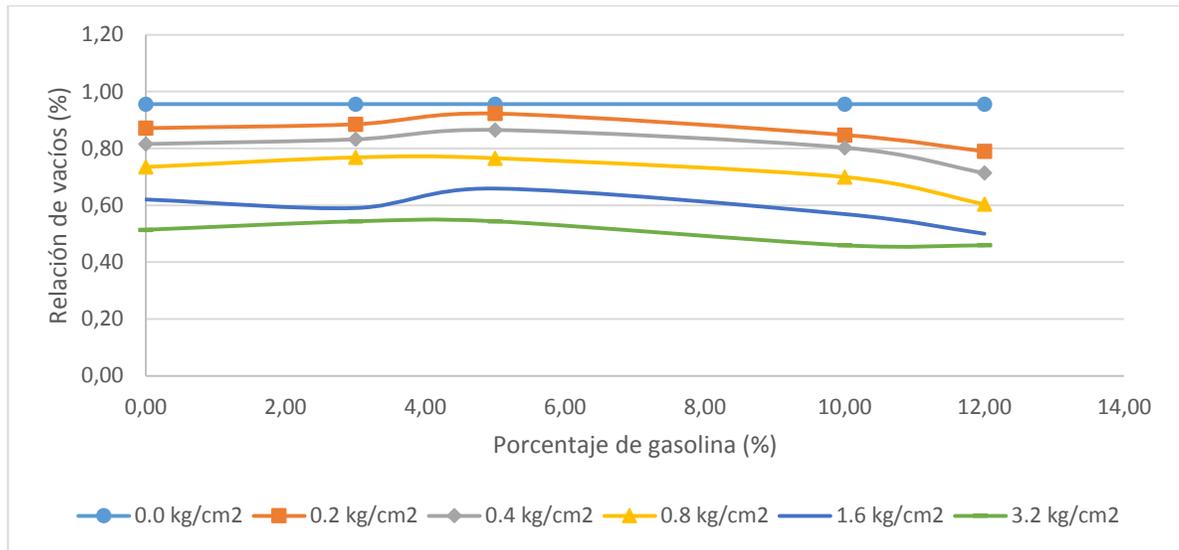
Figura 23. Valores de C_c vs Porcentaje de gasolina.



Fuente: Autores.

La Figura 23 muestra que, al aumentar los porcentajes de gasolina, si bien los valores de compresibilidad respecto a la muestra sin contaminar presentan variación, ésta no posee ninguna tendencia observable. Teniendo en cuenta que una disminución en el valor de C_c resulta favorable en un suelo, se puede concluir que, para las distintas proporciones de gasolina estudiadas, el suelo presenta un mejor comportamiento para el menor y el mayor porcentaje de gasolina usado; mientras que en proporciones intermedias presentan valores cercanos al del suelo sin contaminar. Lo anterior conlleva a plantearse la posibilidad de comportamientos diferenciados en las muestras ocasionados por las cantidades de gasolina, los gráficos muestran que en el porcentaje más bajo y el más alto de los estudiados hay una condición favorable dado de los valores de C_c disminuyen significativamente; ante esto, los autores plantean lo siguiente: En ensayos anteriores se comprobó como ocurría una reorganización de las partículas de suelo gracias a la diferencia de densidades entre los dos líquidos usados, apareciendo partículas con tamaños aparentemente mayores, esta formación se encuentra mejor explicada en porcentajes medios de gasolina dado que en los puntos extremos o hay muy poca gasolina para favorecer tal cohesión aparente o mucha para separar lo suficiente las partículas de suelos. Lo anterior repercute directamente en la relación de vacíos de las muestras de suelo, debido que, para partículas aparentemente mayores, se necesita un incremento de presión mayor para deshacerlos y reducir los espacios vacíos, comparativamente hablando con un suelo formado por partículas individuales (arena o arcilla) para los cuales es relativamente menor la carga que hay que aplicar para reducir los vacíos, y esta diferencia en las presiones aplicadas a uno y otro tiene su impacto en los valores de C_c . Lo anterior explica por qué se presentaron menores valores de C_c en los puntos extremos.

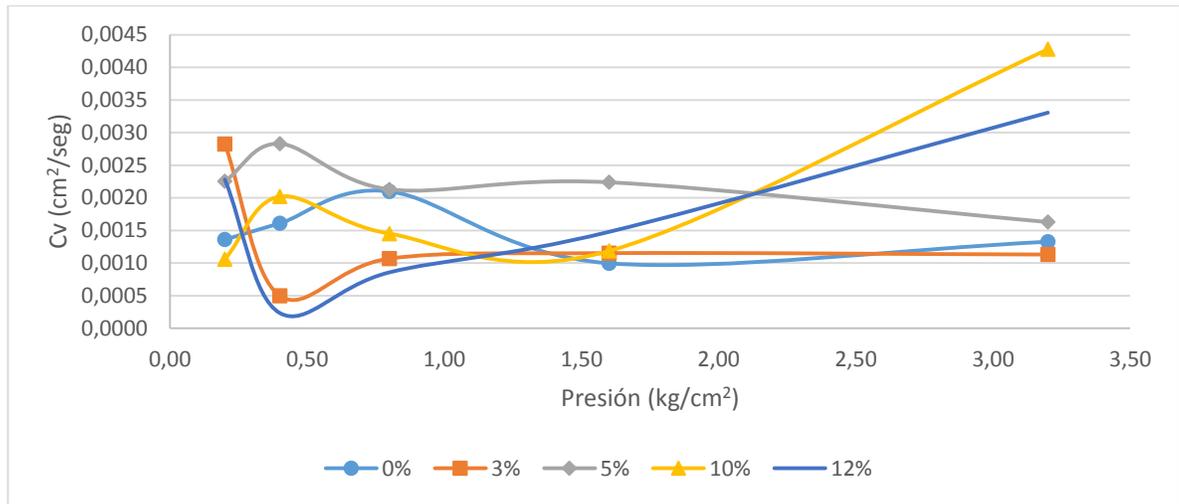
Figura 24. Relación obtenida entre proporción de vacíos y proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

La Figura 24 presenta la relación existente entre la relación de vacíos y porcentajes de gasolina. Se muestra que, para un 5% de gasolina en todas las presiones se encontró el mayor dato de relación de vacíos, luego del cual este valor disminuye. Este fenómeno tiene su explicación en el mismo fundamento explicado en el ensayo de CBR. La diferencia entre las densidades de los materiales (agua, gasolina y suelo) y sus propiedades físicas, propician la aparición de flóculos o cápsulas en la estructura del suelo (reorganización de la estructura del mismo). Al aplicar una carga, los flóculos se aproximan reduciendo la relación de vacíos; sin embargo, esta estructura del suelo no es suficientemente rígida, dado que las partículas que lo forman son creadas por un estado de cohesión aparente; por ello se observa que, en los porcentajes intermedios (5% y 10%) de gasolina y ante una aumento de la presión, no solo se rompe la estructura de los flóculos, sino que la gasolina libre en los vacíos se escapa, logrando que entren en contacto las partículas de suelo (lógicamente de menor tamaño), dando como resultado una disminución en la relación de vacíos y encontrándose valores mayores para la misma.

Figura 25. Relación obtenida entre C_v 50 (kg/cm^2) y proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

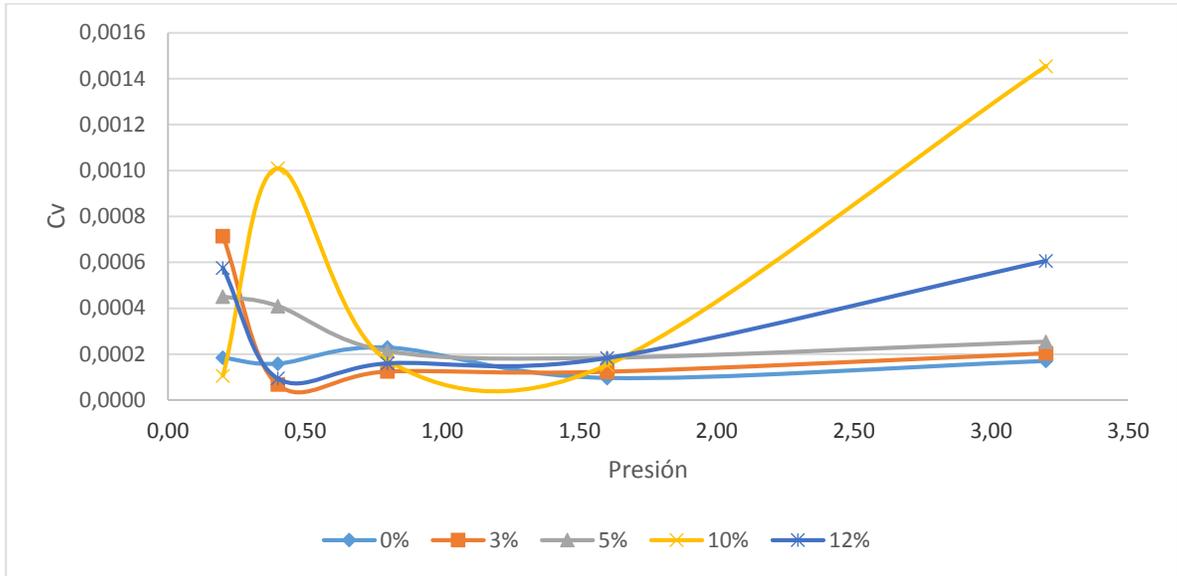
El C_v , o velocidad de consolidación del suelo, al tener un material completamente saturado, dependerá en gran medida de la permeabilidad del agregado antes mencionado. Por lo tanto, un suelo granular, al tener una estructura con granos relativamente grandes, permite una circulación de fluido, lo cual hace que, al ser más fácil el flujo a través de los espacios vacíos, la velocidad de consolidación del mismo se vea favorecida, dando como resultado mayores valores de coeficientes de consolidación C_v . En tanto que para suelos más finos, el espacio entre partícula y partícula es menor, la circulación de fluido es más lenta y, por tanto, los coeficientes C_v son menores.

Partiendo de esta base, se puede observar en la Figura 25 que la gasolina afecta la velocidad de consolidación del suelo. Al comparar con la muestra patrón se encuentran tendencias similares entre los porcentajes 3 y 12 y 5 y 10 %; al igual que en la muestra patrón, entre las dos primeras presiones hay una tendencia a aumentar la velocidad de consolidación, para un 5 y 10 % de gasolina, lo que es lógico dado que se espera que en las primeras horas el suelo experimente una rápida reducción en la relación de vacíos; sin embargo para los otros dos porcentajes, 3 y 12%, el comportamiento es contrario; como se mencionó anteriormente, el

tamaño de las partículas influye en la capacidad de drenaje de un suelo, ante la no formación de partículas de mayor tamaño para un 3 y 12% de gasolina las velocidades de consolidación son menores; comportamiento contrario al esperado. Ahora bien, al igual que en otros ensayos, se muestra como para C_v 50 y C_v 90 la interfaz agua- gasolina propicia la aparición de flóculos, los cuales son partículas aparentemente mayores, que permiten un drenaje más rápido y, por tanto, mayor velocidad en la reducción de vacíos.

En el caso de las presiones finales, se esperaría un aumento en la velocidad de consolidación debido a los valores tan altos de carga 32 y 64 kilogramos, los flóculos, de los que se habló anteriormente, tienden a desmoronarse, liberando, por tanto, los fluidos (principalmente gasolina) que los mantenían unidos. Las muestras con mayor cantidad de gasolina (10% y 12%) la pierden rápidamente, propiciando un aumento sustancial en la velocidad de consolidación, mientras que para los valores de 3 y 5% se presenta una caída en el valor de velocidad al acercarse a la última presión, dado que, se teoriza, ya habrían liberado la mayor cantidad de gasolina que contenían desde un principio, teniendo una estructura más compacta y menos proclive a deformarse, incluso ante una carga tan grande. Lo anterior se puede evidenciar en los siguientes gráficos, donde se observa para un 3 y un 5% de gasolina se llega a un tope máximo de velocidad y posterior a la misma la variación de la velocidad es muy mínima.

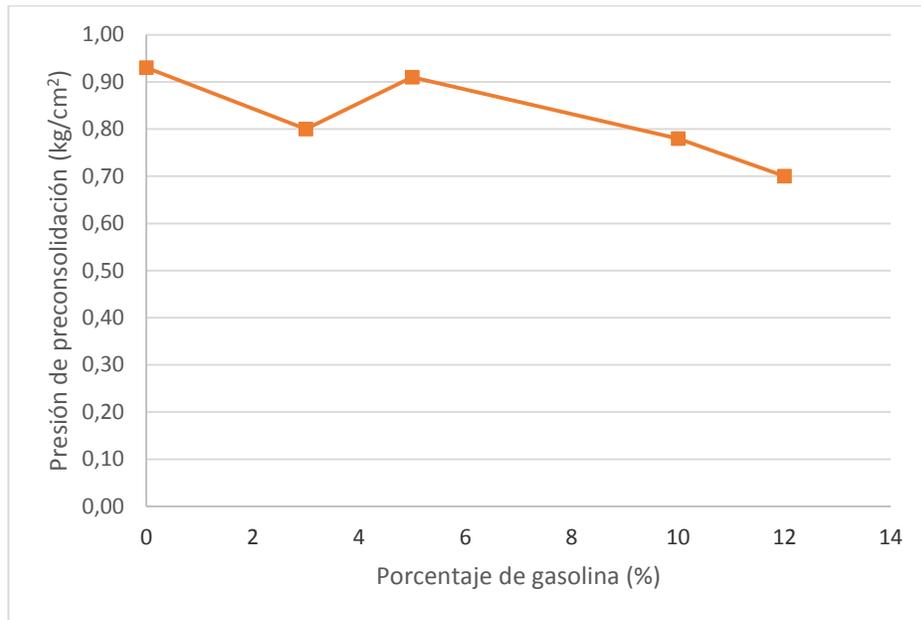
Figura 26. Velocidad de consolidación $C_v 90$ (cm^2/seg) vs presión.



Fuente: Autores.

Las Figuras 25 y 26 muestran los valores de velocidad de consolidación (C_v50 y C_v90) para la presión de pre-consolidación, calculados para cada uno de los porcentajes de contaminante. Es esencial resaltar la importancia de este parámetro, pues es un índice que permite visualizar una analogía entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos; lo cual determina la relación esfuerzo/deformación del material. Esta relación se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Relación obtenida entre presión de preconsolidación y proporción de gasolina.



Fuente: Autores.

En cuanto a la presión de consolidación es claro que la incidencia de la gasolina ocasiona una disminución en los valores de la misma; curiosamente, se observan tendencias similares a las de otros parámetros, donde los dos porcentajes medios de gasolina están presentando los mayores valores, reforzando la idea de que estas proporciones de gasolina favorecen una aparente mejor restructuración de las partículas de suelo dentro de las muestras. Ahora bien, la Figura 28 indica que en caso de una contaminación con gasolina el porcentaje más favorable sería el de un 5% debido a que, siendo mayor la presión de pre-consolidación, el suelo puede soportar esfuerzos efectivos mayores sin muchas variaciones en la relación de vacíos; en otras palabras, el suelo con una presión de pre-consolidación alta es capaz de soportar grandes cargas sin muchas deformaciones.

De acuerdo con el análisis realizado, se definió como porcentaje de gasolina más desfavorable el 12%. Resumiendo, todos los resultados, en forma porcentual, se construyen la Tabla 19.

Tabla 19. Resumen de desviaciones calculadas y promedio de desviaciones obtenido.

Humedad Optima	Densidad de Compactación	CBR	Ángulo de Fricción	Cohesión	Cv	Cc	Relación de Vacíos	Presión de Pre-consolidación	Promedio de desviaciones
14.90%	0.42%	69.38%	1.90%	4.39%	49.05%	4.84%	5.42%	13.98%	18.25%
12.61%	0.32%	175.78%	31.47%	76.84%	47.62%	7.37%	2.53%	2.15%	39.63%
38.49%	0.94%	426.10%	36.04%	71.34%	0.00%	8.09%	18.31%	16.13%	68.38%
47.18%	2.18%	338.10%	18.81%	48.47%	59.05%	5.76%	16.45%	24.73%	62.30%

Fuente: Autores

De acuerdo con lo descrito en la metodología, en el inciso 5.3, se eligió a 12% como porcentaje crítico, aunque el de 10% presentaba una desviación mayor. Esta selección se justifica en el hecho de que es mayor el número de parámetros que tienen a 12% como su proporción crítica; se justificó este criterio en que, con el promedio, valores como CBR y ángulo de fricción poseían un mayor peso en éste.

6.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA DE ESTABILIZACIÓN.

Tal como se indicó en la metodología, la segunda etapa comprendió los procesos de estabilización de la muestra considerada como crítica. Se evaluaron entonces las muestras bajo el comportamiento de tres tipos de estabilizantes recomendados por la teoría y su uso extendido en la estabilización de suelos: cemento, cal y asfalto. Es importante mencionar que los procesos de estabilización se realizaron por medio de mezclado entre el material a estabilizar y el estabilizante. A continuación se muestra un cuadro resumen, con los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros evaluados en la primera fase, para cada estabilizante.

Para esta segunda fase, el análisis se basó en los resultados obtenidos para cada estabilizante, evaluándolos por ensayo.

El primer estabilizante en evaluar, fue el cemento. Inicialmente, y de acuerdo con la teoría se establecieron las condiciones en las que se recomienda el uso del cemento como estabilizante de un suelo. Se recomienda entonces, restringir los tratamientos con cemento a los suelos con un índice de plasticidad inferior a 15; en el caso de estudio el índice de plasticidad del material no supera dicho valor, por lo que se puede aplicar perfectamente el tratamiento. Adicionalmente, se recomienda que en el caso de usos en pavimento para sub-rasante y el suelo posee valores de CBR menores al 2% estos deben ser estabilizado. En el caso particular de estudio, la muestra sin contaminación puede ser perfectamente usada para sub-rasante debido a que presenta un CBR de 6.4%, lo anterior permite evaluar si con el uso del estabilizante el suelo se puede usar además en base y sub-base. (IECA, 2013) (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2008)

En cuanto a los porcentajes de cemento, a evaluar, se encontró en la revisión bibliográfica que, según Mitchell y Freitag para suelos clasificados por las AASHTO como A-2 los porcentajes de cemento están entre un 6 y un 10% (Michel & Freitag, 1959).

Tabla 20. Porcentaje de cemento por volumen.

Tipo de suelo		Porcentaje de cemento por volumen
Clasificación AASHTO	Clasificación unificada	
A-2 y A-3	GP, SP y SW	6-10
A-4 y A-5	CL, ML y MH	8-12
A-6 y A-7	CL, CH	10-14

Fuente: Mitchell y Freitag (1959)

Teniendo en cuenta la anterior, y considerando que en el estudio se manejó un suelo tipo A-2-4 contaminado con gasolina, se determinó que se utilizaría un porcentaje dentro del rango (10%) y uno mayor (20%), para así tener una idea mejor del comportamiento del suelo una vez estabilizado. Por otra parte, es bien sabido que el uso de la cal como estabilizante de un suelo, proporciona el aumento de propiedades mecánicas de resistencia, reducción de la plasticidad y el aumento de trabajabilidad, por tal razón se evaluó como estabilizante en las muestras contaminadas con gasolina.

En el estudio realizado por Elizondo et. al (2009), se incluye un capítulo que describe las propiedades que debe tener un suelo para requerir una estabilización con cal, citando:

Existen algunas consideraciones generales que permiten seleccionar a la cal como el estabilizador más apto para un suelo específico; estas son la granulometría y la plasticidad o textura del suelo. Como regla general la cal reaccionará con los suelos de mediana y alta plasticidad produciendo un decremento en el Índice de Plasticidad, aumento de trabajabilidad, disminución de expansión, y aumento de resistencia. La

cal es utilizada para la estabilización de una gran variedad de materiales incluyendo suelos de muy baja resistencia, transformándolos en una superficie de trabajo estable o con propiedades mecánicas similares a las de una sub-base (material granular) (Elizondo Arrieta, Navas Carro, & Sibaja Obando, 2009).

Este fragmento sustenta el hecho de que la cal actúa a nivel molecular, afectando la estructura primordial del suelo, reduciendo humedad, etc. modificando entonces la plasticidad de los suelos. Para el suelo que se tiene en este estudio (areno arcilloso), no sería recomendable utilizar cal como estabilizante, puesto que es un suelo de baja plasticidad (Límite líquido menor a 50%) y granulometría que tiende a ser mucho más granular (pasa por el tamiz 200 un 0.38%) Sin embargo, al considerar el uso de un contaminante líquido, como lo es la gasolina, se observó, que el uso de la cal podría suponer una ventaja en el tratamiento del mismo, puesto que disminuye la saturación de suelo y proporciona estabilidad a la estructura del mismo.

En cuanto a la definición de los porcentajes utilizados, se recomienda que se lleven a cabo ensayos en laboratorio con varios porcentajes, debido a que el porcentaje óptimo de cal depende del tipo de suelo. *Huezo & Orellana (2009)* sostienen que, generalmente, los porcentajes de cal utilizados en una estabilización variarán de un 2 a 8% en peso, pero aclaran que este variará de acuerdo con el tipo de suelo. Debido a las limitaciones de tiempo para realizar un muestreo exhaustivo, y con el objetivo de establecer un paralelo entre los diferentes estabilizantes, en este estudio se optó por usar para la cal un 10% como valor próximo a lo recomendado en la teoría y un 20% considerando el 12% del contaminante como condición atípica que poseen las muestras estudiadas.

El tercer estabilizante que se consideró fue el asfalto, el uso de este material como estabilizante está restringido a suelos granulares y de partículas gruesas, la condición mixta del suelo usado en los ensayos, permite evaluar entonces además de los otros estabilizantes, el asfalto; el uso de este material tiene dos fines, en el caso en particular, dado que se busca un incremento en la resistencia del material, la teoría recomienda el uso de porcentajes altos

de asfalto, por lo que los porcentajes elegidos para evaluar fueron 10 y 20%, considerando además hacer un comparación entre los tres estabilizantes seleccionados.

Luego de la selección de los porcentajes de estabilizante, se procedió a realizar la estabilización de las muestras contaminadas. Hay que anotar que la metodología de trabajo para la segunda etapa fue similar a la usada en la primera; es decir, al suelo se mezcló con el contaminante, e inmediatamente se mezclaba el material contaminado con el estabilizante, mezclando hasta obtener homogeneidad, para proceder a realizar los ensayos respectivos. El Tabla 21, muestra las propiedades mecánicas analizadas, clasificadas por estabilizante y por porcentaje de éste. Es importante decir que, el análisis para esta etapa se enfocó en elegir uno de los tres materiales usados para mejoramiento, tomándolo como el estabilizante apto para resolver un problema de contaminación con gasolina en el tipo de suelo estudiado.

Tabla 21. Resumen de desviaciones calculadas y promedio de desviaciones obtenido.

ENSAYO	PROPIEDAD	12 % GASOLINA	10% CAL	20% CAL	10% CEMENTO	20% CEMENTO	10% ASFALTO	20% ASFALTO
PROCTOR MODIFICADO	DENSIDAD MÁXIMA (g/cm ³)	1.856	1.893	1.779	1.843	1.856	1.938	1.860
	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	15.410	9.420	16.390	17.600	13.020	16.040	16.360
CBR	CBR (%)	28.040	13.680	16.680	8.340	8.750	2.670	2.270
CORTE DIRECTO	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	40.610	33.860	32.340	22.250	35.950	17.820	17.430
	COHESIÓN (kg/cm ²)	0.319	0.026	0.250	0.407	0.055	0.087	0.049
CONSOLIDACIÓN	COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD	0.160	0.310	0.380	0.160	0.070	0.250	0.270
	RELACIÓN DE VACÍOS (ÚLTIMA %)	0.666	1.077	0.998	1.079	1.192	1.014	0.715
	COEFICIENTE DE CONSOLIDACION Cv50 (cm ² /seg)	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
	COEFICIENTE DE CONSOLIDACION Cv90 (cm ² /seg)	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	PRESION DE PRECONSOLIDACION (kg/cm ²)	0.590	2.100	1.800	0.950	1.200	1.300	0.800

Fuente: Autores.

Para los parámetros obtenidos a través del ensayo de Proctor modificado, se tiene que, la densidad de cada uno de los estabilizantes juega un papel fundamental. En este apartado, el cemento gris es quien tiene el mayor peso por unidad de volumen (aproximadamente 1500 kg/m^3); luego el asfalto (entre 1000 y 1030 kg/m^3), y por último la cal con 223 kg/m^3 . Se esperaría entonces que las muestras estabilizadas con cemento muestren un mejor comportamiento, con valores densidad de compactación, superiores a las muestras para los otros dos contaminantes. Sin embargo, en la Tabla 21 se observa como las mayores densidades de compactación máxima se obtuvieron de las muestras estabilizadas con asfalto; lo anterior puede explicarse al decir que, al ser un conglomerado viscoso, el asfalto tiene mayor facilidad de entrar a los poros, rellenándolos y obteniendo una mezcla más densa; adicionalmente, los valores obtenidos para este resultan favorables, puesto que en el caso de la cal y el cemento, es necesario que se den las reacciones de hidratación. En cuanto a la humedad óptima, no se considera una propiedad mecánica per se, pero, realizando el análisis, la cal tendría la mayor capacidad de absorción de líquidos, haciendo que sea este material el de mejor comportamiento, dado que las humedades óptimas son menores, y el suelo requiere de menor cantidad de agua para alcanzar el valor óptimo; contrario al asfalto, dado que, al ser parcialmente líquido, incrementa considerablemente la humedad del suelo.

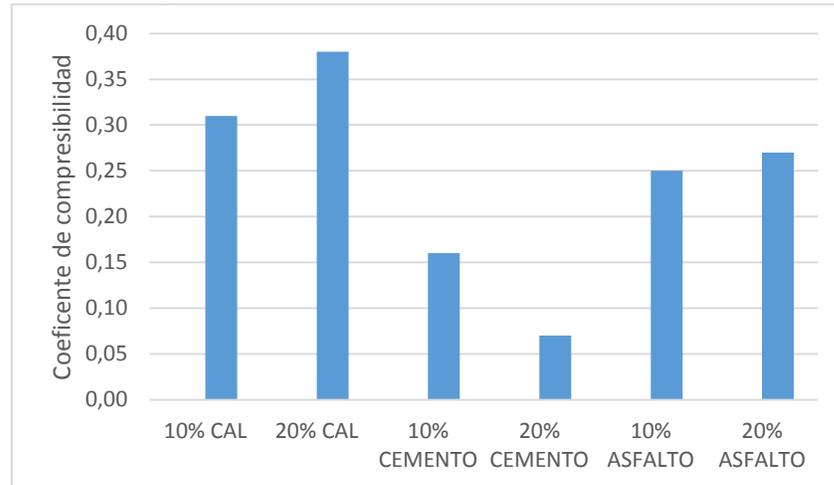
En cuanto a la medida indirecta de resistencia del suelo (CBR), es un vistazo a cómo se comporta el material una vez estabilizado. Por sus mismas propiedades, parcialmente líquido, viscoso y aceitoso, el asfalto constituye un material que afecta de manera negativa el funcionamiento de este parámetro, permitiendo que el suelo se deforme con cargas relativamente pequeñas; con el cemento se obtuvieron mejores resultados, comparando con el asfalto, pero no resultó suficiente para obtener el mejor comportamiento; este lugar lo ocupa la cal, siendo un material que propicia una mejor resistencia a la penetración, añadiendo su trabajo en la disminución de humedad, resulta un estabilizante ideal para el índice CBR. En este punto, se encuentra un resultado interesante de este estudio, para todas las muestras estabilizadas con los distintos porcentajes de contaminantes, ninguna superó el valor para CBR obtenido para el suelo contaminado, en consecuencia, en lugar de mejorar la resistencia del suelo al intentar estabilizarlo, los diferentes estabilizantes logran un efecto

diametralmente opuesto, lo que lleva a concluir que es el contaminante el que produce una mejora aparente en el valor de CBR.

En el caso de los parámetros obtenidos a través del ensayo de corte directo, al igual que en CBR, el asfalto no propició una mejora en cuanto a resistencia mecánica del suelo, pues los valores de ángulo de fricción y cohesión para este estabilizante fueron bastante bajos, comparándolos con los obtenidos al estabilizar con cal y cemento. Respecto a estos últimos, el cemento, para un porcentaje de 20%, es el que presenta el mayor valor de ángulo de fricción, y es la muestra estabilizada con 10% de este aglomerante que obtiene el mayor valor de cohesión. En esto se evidencia las propiedades del cemento portland, el cual, a bajos porcentajes, se hidrata y consigue un alto nivel de cohesión, mientras que, con porcentajes más altos, el cemento no se alcanza a hidratar todo, por lo cual el valor de cohesión no es tan alto, pero sí destaca el ángulo de fricción, con lo que se obtiene un suelo estabilizado con un buen nivel de resistencia. En cuanto a la cal, presenta muy buenos valores de ángulo de fricción, pero ninguno como el obtenido para 20% de cemento. De la misma manera con la cohesión. Nuevamente, para estos parámetros, los valores obtenidos después de estabilizar siguen siendo menores que los obtenidos para los mismos parámetros solo con la muestra contaminada con el 12% de gasolina.

Finalmente, se tienen los resultados obtenidos con el ensayo de consolidación. Son varias las propiedades a analizar para este ensayo. Comenzando con la más básica, que sería la razón de compresibilidad, o Cc. Anteriormente se ha establecido que un mayor valor de Cc no sería lo ideal para el suelo, puesto que propiciaría un suelo más proclive a ser deformado. Teniendo en cuenta esto, de acuerdo con la Tabla 21, el mejor estabilizante sería el cemento, pues proporciona los menores valores de este parámetro. Este fenómeno puede tener su explicación en que, al estar en un medio totalmente saturado, el cemento se encuentra en el ambiente propicio para que se dé el fraguado, agregando al suelo, además de la resistencia, mayor capacidad de tolerar altas cargas sin que ello se vea reflejado en una gran deformación. La Figura 28 muestra los resultados obtenidos para cada una de las muestras ensayadas.

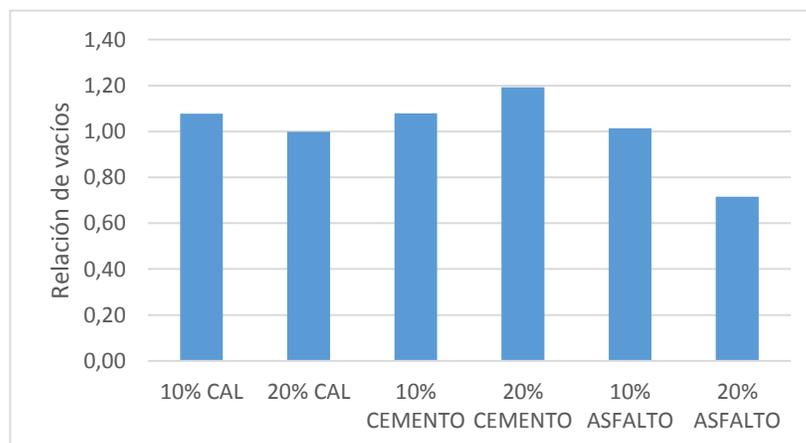
Figura 28. Índice de compresibilidad vs estabilizante.



Fuente: Autores.

La relación de vacíos va ligada muy de la mano con la compresibilidad, pues, si el suelo se deforma a mayor velocidad, lógicamente sus relaciones de vacíos van a ser menores. Es por eso que, haciendo el análisis correspondiente, un suelo con menor relación de vacíos resulta más provechoso desde el punto de vista estructural, puesto que es un suelo más compacto y menos propenso a sufrir grandes deformaciones. Teniendo esto en cuenta, se presenta el Figura 29, con los valores obtenidos de relación de vacíos

Figura 29. Relación de vacíos vs estabilizante.

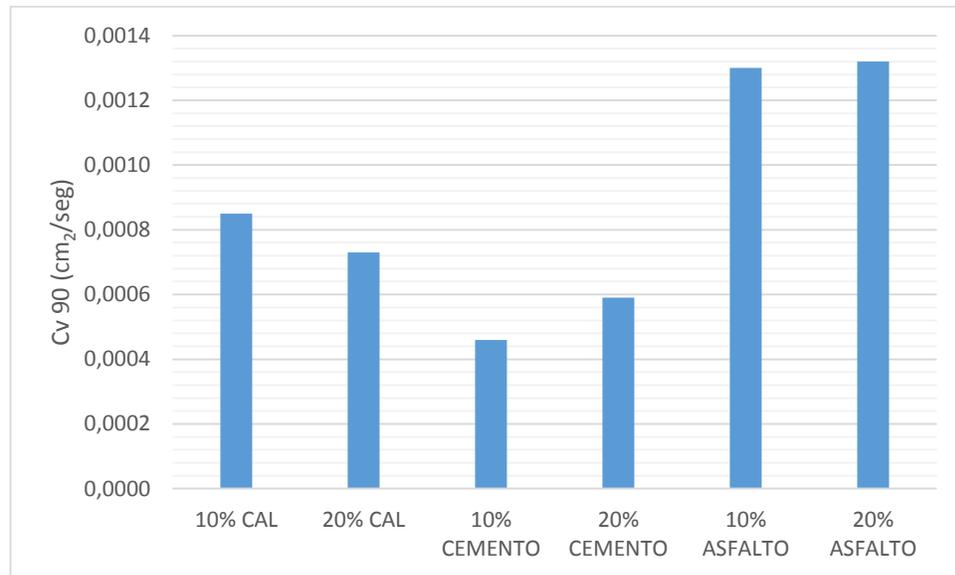


Fuente: Autores.

De acuerdo con la Figura 30, se evidencia que las menores relaciones de vacíos las tienen las muestras estabilizadas con emulsión asfáltica; esto se explica diciendo que, al ser viscosa, la emulsión asfáltica tiene mayor facilidad para llenar espacios vacíos a la que pueden tener otros compuestos como la cal y el cemento; es así, pues, que la emulsión asfáltica es el material ideal en cuanto a relación de vacíos refiere.

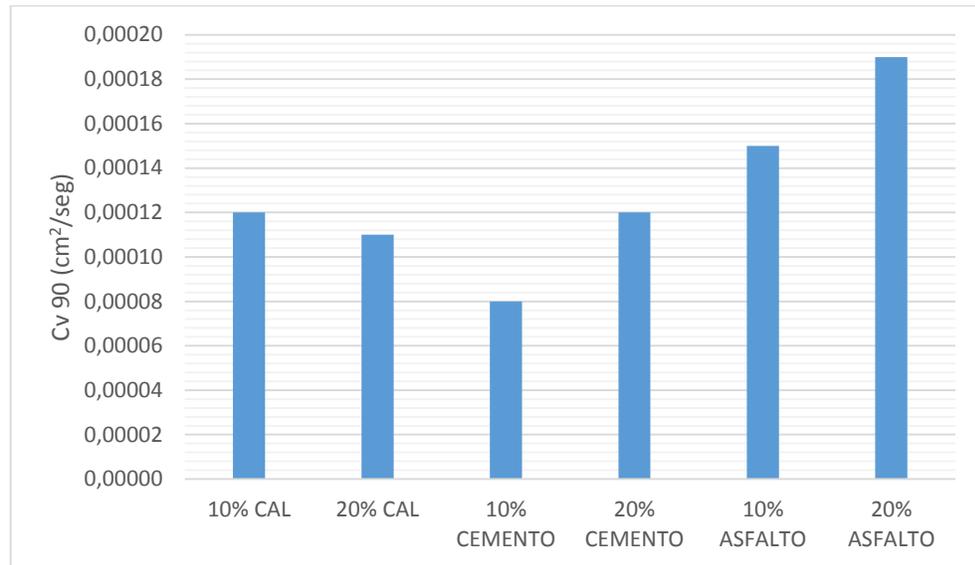
Los coeficientes de consolidación, o C_v , son otros parámetros importantes en el comportamiento del suelo, puesto que da un índice de disminución de volumen por unidad de tiempo, el cual da una idea de cuántos vacíos ha perdido realmente el suelo. Las Figuras 30 y 31 muestran los resultados obtenidos para $C_v 50$ y $C_v 90$, respectivamente.

Figura 30. $C_v 50$ vs estabilizante.



Fuente: Autores.

Figura 31. Cv 90 vs estabilizante.

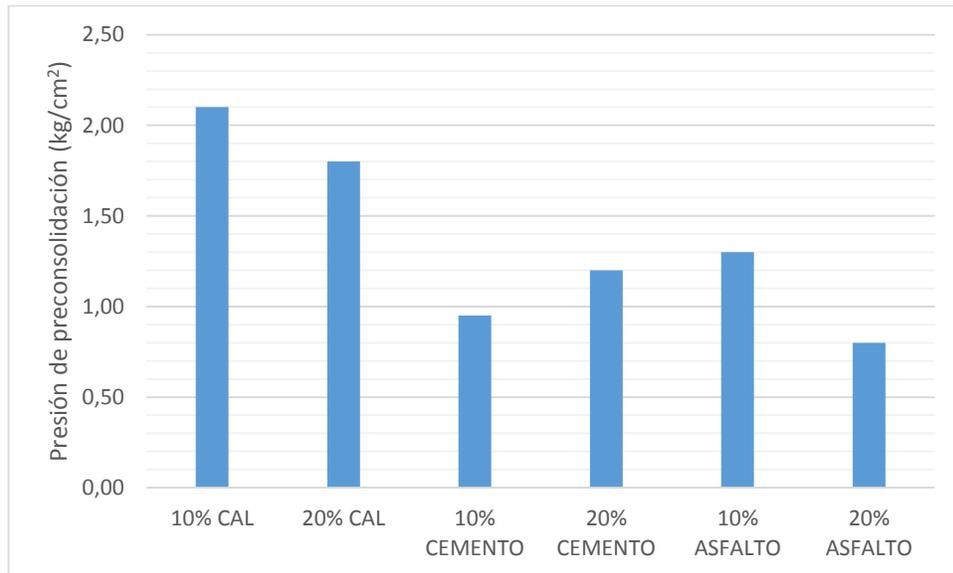


Fuente: Autores.

Consistente con los resultados de C_c , se observa que $C_v 50$ es menor para el cemento, por otra parte, para $C_v 90$ los resultados no son muy diferentes, puesto que asfalto y cal (sobre todo asfalto) poseen valores muy altos, lo que deja entrever que no producen un mejoramiento en el parámetro analizado.

Cierra el análisis la presión de pre-consolidación que, aunque no es una propiedad mecánica, sí es un indicador muy importante para el comportamiento durante la consolidación del suelo, puesto que es la carga a partir de la cual el suelo empieza a tener deformaciones significativas con cada aumento de carga, cosa que, antes de dicha presión, no sucede (es decir, antes de dicha presión las deformaciones son relativamente bajas). La definición teórica de presión de pre-consolidación es “la mayor carga que el suelo ha soportado en su historia geológica” (Das, Braja M., 1985). Teniendo en cuenta lo anterior, se deduce que a mayor sea este valor, mejor será el suelo, puesto que mayor será la carga necesaria para que éste presente grandes deformaciones. La Figura 32 presenta los valores de presión de pre-consolidación calculado para cada estabilizante analizado.

Figura 32. Presión de preconsolidación vs estabilizante.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, de acuerdo con la Figura 32, la cal es el estabilizante que le confiere un mejor comportamiento al suelo, puesto que arroja los mayores valores de este parámetro. La razón de dicho comportamiento se debe a que la cal hidratada, a diferencia de los otros estabilizantes, reacciona directamente con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una matriz cementante; si bien el cemento hace lo propio, las reacciones que se dan en esta mezcla son las de hidratación del cemento que al fraguar, confiere una mayor resistencia pero no actúa directamente en las partículas del suelo.

Teniendo en cuenta todo lo analizado, para cada propiedad mecánica estudiada en esta fase, se elaboró el Tabla 22, el cual es un resumen de tipo cualitativo, que muestra cada uno de estos parámetros, acompañados del estabilizante más favorable para cada uno de ellos, extraídos del anterior análisis.

Tabla 22. Estabilizante más favorable para cada propiedad mecánica.

ENSAYO	PROPIEDAD	ESTABILIZANTE MÁS FAVORABLE
PROCTOR MODIFICADO	DENSIDAD MÁXIMA	ASFALTO
	HUMEDAD ÓPTIMA	CAL
CBR	CBR	CAL
CORTE DIRECTO	ANGULO DE FRICCION	CEMENTO
	COHESIÓN	CEMENTO
CONSOLIDACIÓN	COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD	CEMENTO
	RELACIÓN DE VACÍOS (ÚLTIMA)	ASFALTO
	COEFICIENTE DE CONSOLIDACION Cv50	CEMENTO
	COEFICIENTE DE CONSOLIDACION Cv90	CEMENTO
	PRESION DE PRECONSOLIDACION	CAL

Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES

La reutilización en procesos constructivos de suelos contaminados con gasolina, entendiendo que el suelo es un recurso no renovable y su reutilización es vital, en una industria tan importante como lo es la construcción; fue la principal razón para la realización de este estudio. En la búsqueda de alternativas diferentes a la bioremediación de los suelos, se estudiaron cada una de las propiedades mecánicas de un suelo areno-arcilloso contaminado en el laboratorio con diferentes proporciones de gasolina. Los autores partieron de la idea de que, al contaminar un suelo con gasolina, no solo se producían afectaciones de tipo ambiental, sino que desde el aspecto técnico, entendiéndose este como las propiedades mecánicas que posee un suelo, importante en los procesos de construcción, también se verían afectadas. A continuación se muestran los interesantes resultados obtenidos de los ensayos:

- En primer lugar se encontró que, la cantidad de gasolina con la cual se contamine un suelo, resulta determinante en el comportamiento del mismo; resultados como los obtenidos en ensayos como corte directo, CBR, y Consolidación lo demuestran.
- Muchas de las fuentes consultadas, coinciden en que los hidrocarburos deterioran los parámetros mecánicos de los suelos, los parámetros de filtración, plasticidad, expansividad y otras propiedades; es decir, que la presencia del contaminante solo produce efectos negativos sobre las propiedades mecánicas de los suelos. Sin embargo, dependiendo del tipo de suelo y del contaminante algunas propiedades pueden verse favorecidas, la resistencia a cizalladura por ejemplo, aumenta en presencia de contaminantes (Murat & Yildiz, 2010 Como citó Mohammed & Abdullahi, 2013).
- Un suelo areno-arcilloso contaminado con concentraciones inferiores al 10% de gasolina, es recomendable para su uso en la construcción como subrasante y sub-base en pavimentos. En cuanto su uso como suelo de soporte de cimentaciones superficiales, se recomienda la realización de estudios de casos puntuales considerando condiciones de cargas específicas, debido a que es posible que la presencia de gasolina favorezca algunas propiedades mientras que contribuye al detrimento de otras.

- La diferencia de densidades entre los dos líquidos que componían las muestras (agua y gasolina), propicia una restructuración en el suelo; es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos se explican cómo cambios físicos en la estructura del suelo. Lo anterior no solo por la existencia de fuentes que afirman que la gasolina no genera ningún cambio mineralógico en las partículas de suelo, sino porque se comprobó que dependiendo de la cantidad de gasolina utilizada, se presentaba una restructuración del suelo, es así como se encontró que para porcentajes intermedios 5% y 10% se observó un mejor comportamiento que para 3% y 12% del contaminante.
- La gasolina propicia la formación de flóculos, debido a la diferencia de densidad que posee con el agua, esta al ser un líquido hidrofóbico favorece el rompimiento de la doble capa eléctrica formada por las moléculas de arcilla, esto hace que las partículas del suelo se agrupen, formando nuevas partículas de aparentemente tamaños mayores, lo anterior se ve sustentado en el hecho que para ensayos como el de CBR, el suelo termine aportando valores entre 10% y 33% aproximadamente, valores que según la teoría pueden corresponder a suelos con tamaños mayores de partículas como gravas, arenas bien graduadas, gravas arcillosas e incluso gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con pocos finos o sin ellos, arrojando valores de CBR superiores a 30% inclusive.
- A partir de los resultados obtenidos para la primera fase, queda evidenciado el hecho que la gasolina posee un impacto sustancial en las propiedades mecánicas del suelo, tal como se evidencia en las desviaciones calculadas en cada ensayo. Se eligió la proporción de 12% como la proporción con el comportamiento crítico, con la que se realizó la fase dos.
- Al contaminar un suelo con gasolina propiedades como la densidad de compactación se ven afectadas, los resultados muestran como este parámetro disminuye hasta en un 2.18%, una disminución en la densidad de compactación repercute en una mayor relación de vacíos, lo cual, a su vez, indica un suelo muy susceptible a grandes deformaciones bajo carga impuesta.

Uno de los parámetros más afectados negativamente es la cohesión. Si bien es cierto que, para porcentajes entre un 5% y un 10%, la formación de flóculos puede verse favorecida por no existir ni muy poca o mucha gasolina, los valores de la cohesión se ven seriamente afectados dando para todos los porcentajes, un valor inferior al de la muestra natural.

- Entre los parámetros que se ven afectados de manera positiva destaca el CBR. Si bien tiene una caída después de 10%, antes de este porcentaje el suelo posee unos valores bastante aceptables de este índice, lo cual sería beneficioso en la construcción de vías como subrasante o sub-base, incluso, tal como se ha consultado en la bibliografía algunos estudios relacionados con la estabilización con cemento.
- En los casos de otros parámetros, como pueden ser ángulo de fricción, índice de compresibilidad, coeficiente de consolidación o relación de vacíos, se logran mejoras aparentes por razones ya expuestas en otros incisos; específicamente, el ángulo de fricción se ve teóricamente mejorado por la formación de flóculos que, funcionan como una partícula más grande, permitiendo la trabazón entre granos. En cuanto a los índices de compresibilidad y de consolidación, se logra un vaciado más rápido de los fluidos almacenados en los espacios vacíos, propiciando que el suelo alcance una gran parte de sus deformaciones en tiempos cortos; y, esencialmente, a través de la relación de vacíos se deja implícito el papel de la gasolina en la mezcla. El contaminante se entromete en los poros del suelo, propiciando una reestructuración de las partículas del mismo, reduce la resistencia al compresión, favorece la consolidación, y por ende, se obtiene un suelo más compacto y menos proclive a sufrir grandes deformaciones. En términos generales, estos índices se traducen en un suelo más resistente y apto para labores de ingeniería.

En cuanto a la etapa de estabilización, es importante mencionar que, de acuerdo con lo obtenido en los ensayos, se encontraron resultados inesperados. Como se ha expresado anteriormente, se intentaba determinar cuál de los tres tipos de estabilizantes de uso extendido y recomendado por la teoría, mejoraría las propiedades de un suelo después de contaminarse con gasolina. Sin embargo, se muestra como para parámetros como CBR,

ángulo de fricción, relación de vacíos, en lugar de conseguir mejoras, los valores muestran un detrimento de la propiedad. Esta condición probablemente se deba a que el nuevo componente de la mezcla intervenga en los proceso de formación de floculos.

- Como conclusión general del proceso de estabilización, se tiene que el cemento es el estabilizante que más propiedades mecánicas mejora de los tres estudiados. Sin embargo, los resultados muestran que dependiendo del uso del suelo y de los resultados que se esperen para un parámetro en particular, se puede usar uno u otro estabilizante; por ejemplo, si un suelo contaminado con gasolina se utilizará para subrasante de una vía, e incluso como sub-base, necesita un alto valor de CBR, y para esto deberá ser estabilizado con cal, puesto que fue este material el que obtuvo los mayores valores en este parámetro.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda que se sigan realizando estudios de esta índole, con distintos tipos de suelo, y distintos tipos de contaminantes (sean hidrocarburos o no). El tema es sumamente importante y la literatura se queda corta al respecto. Como ya se mencionó la complejidad del suelo como material requiere de la realización de numerosos ensayos que corroboren lo planteado. Para estos futuros ensayos se recomienda analizar la influencia de cada porcentaje por separado, puesto que la realización de todos los ensayos es realmente dispendiosa.

Dada la complejidad de los ensayos y la gran cantidad de factores que no se pueden controlar, el número de pruebas por muestra fue limitado, de modo que se recomienda que para cada parámetro evaluado, se realicen mayor cantidad de ensayos, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados y poder realizar verdaderos análisis estadísticos con tamaños de muestras representativos.

Por otra parte para futuras investigaciones relacionadas con la temática, se deberían considerar dos puntos que por limitaciones no se abarcan en este trabajo, el primero tiene que ver con la realización de los ensayos en casos puntuales o más bien con muestra inalteradas tomadas directamente del sitio, puesto que el remoldeó de las muestras está sujeto a variaciones en las condiciones de las mismas; adicionalmente, al considerar casos puntuales se puede establecer condiciones específicas de carga que son fundamentales en ensayos de consolidación y corte directo.

Finalmente, las investigaciones que sucedan a esta deberían considerar los procesos de infiltración, estudiar a fondo como la volatilidad del contaminante y las condiciones atmosféricas y climáticas afectan los ensayos, realizar estudios químicos que establezcan el comportamiento químico de las fracciones arcillosas ante la presencia de hidrocarburos y llevar a cabo estudios que evalúen los posibles impactos ambientales que pueden presentarse al reutilizar en procesos constructivos suelos que hayan sido contaminados con gasolina u otro hidrocarburo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Instituto Español del cemento y sus aplicaciones . (2008). *Manual de Estabilización con Cemento o Cal*. Obtenido de enriqueмонтalar.com:
<http://enriqueмонтalar.com/manual-de-estabilizacion-de-suelos-con-cemento-o-cal/>
- Li , X., Wang , X., & Jason Ren , Z. (6 de Junio de 2015). *ezproxy.unicartagena.edu.co*. Obtenido de ELSEVIER:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0264837715001556/1-s2.0-S0264837715001556-main.pdf?_tid=6a797a8c-3e81-11e5-9b5a-00000aacb35e&acdnat=1439116306_d4385412e7b97876e6f0951c8e9a9068
- A.W. Hago, H. H.-H. (1 de Agosto de 2006). *Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils*. Obtenido de ELSEVIER:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0950061806000766/1-s2.0-S0950061806000766-main.pdf?_tid=ac9ed510-3f12-11e5-8aa3-00000aab0f26&acdnat=1439178694_9ef789964374db5067a7e6cd80e8b5db
- Alvarado, P., & Muñoz, I. (2010). *Correlación del ángulo de fricción interna y CBR tipo Ipara arenas limosas (SM)*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana .
- Ambiente, M. d., & Instituto Geológico y Minero de España. (Mayo de 2007). *Gia Técnica de aplicación del RD 9/2005*. Recuperado el 07 de Agosto de 20015, de http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/suelos-contaminados/guia_tecnica_contaminantes_suelo_declaracion_suelos_tcm7-3204.pdf.
- Anayansi Fong, I., & De Ruiz, A. T. (s.f.). *EL PETROLEO Y SUS PROCESOS DE REFINACIÓN*. Obtenido de Universidad Tecnológica de Panamá:
<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/proyecto/publicacioneselectro/monografias/El%20petr%C3%B3leo%20y%20su%20proceso%20de%20refinaci%C3%B3n.pdf>

- Anopama Balasubramaniam, A. R. (26 de Julio de 2006). *Improving petroleum contaminated land remediation decision-making through the MCA weighting process*. Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S004565350600796X/1-s2.0-S004565350600796X-main.pdf?_tid=df058242-3f17-11e5-b5ed-00000aacb362&acdnat=1439180926_b6dca7720cf463761b1eea121556de6e
- Bermúdez, E. M. (26 de julio de 2014). *Putumayo: entre el miedo y los derrames de hidrocarburos*. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/putumayo-entre-el-miedo-y-los-derrames-de-hidrocarburos/14306584>: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/putumayo-entre-el-miedo-y-los-derrames-de-hidrocarburos/14306584>
- Bromal, D., Wang, H., Pizzol Lisa , Crito, A., & Giubilato, E. (15 de Mayo de 2015). *Soil environmental management systems for contaminated sites in China and the EU. Common challenges and perspectives for lesson drawing*. Obtenido de ezproxy.unicartagena.edu.co:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0264837715001556/1-s2.0-S0264837715001556-main.pdf?_tid=fa85c4f4-3ea5-11e5-8fb5-00000aacb361&acdnat=1439132009_1993fb752467cd89a3a6c9bce703c3eb
- Bustos Salamea, M. A., & Mosquera Molina, J. B. (2003). *RESPONSABILIDAD DEL ESTADO POR DERRAMES EN LA ACTIVIDAD PETROLERA*. Recuperado el 17 de 08 de 2015, de [javeriana.edu.co](http://www.javeriana.edu.co):
<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/derecho/dere5/TESIS82.pdf>
- C. Riccardi, P. D. (28 de Febrero de 2013). *Identification of hydrocarbon sources in contaminated soils of three industrial areas*. Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S004896971300137X/1-s2.0-S004896971300137X-main.pdf?_tid=be30f758-3f13-11e5-b5ed-00000aacb362&acdnat=1439179153_1194ddc8718171bd28134fdfa4b38a74
- Castaño, D. O. (28 de 08 de 2014). En seis mese, producción de petroleo en Santander crecio 16%. *Vanguardia.com*. Recuperado el 14 de agosto de 2015, de

<http://www.vanguardia.com/economia/local/275863-en-seis-meses-produccion-de-petroleo-en-santander-crecio-16>

Ceballos Candanoza, F. G., & Lorduy Barguil, E. J. (2006). *Diagnostico preliminar de suelos susceptibles a contaminación en la ciudad de Cartagena*. Universidad de Cartagena , Facultad de Ingeniería, Cartagena.

Ceballos, F. G., & Lorduy, E. J. (2006). *Diagnostico preliminar de suelos susceptibles a contaminación en la ciudad de Cartagena*. Universidad de Cartagena , Facultad de Ingeniería, Cartagena.

Chang, L. C. (06 de Septiembre de 2010). *C.B.R (California Bearing Ratio)*. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de www.cismid.uni.edu.pe:
http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo32_p.pdf

CIOH. (17 de marzo de 2015). *Centros de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas*. Recuperado el 30 de Junio de 2016, de [cioh.org.co](http://www.cioh.org.co):
http://www.cioh.org.co/dev/proserv/dat_generales.htm

Comisión Europea EUROCLIMA. (2014). *EUROCLIMA. Atlas de suelos de América Latina y El Caribe*. Recuperado el 18 de 08 de 2015, de www.fao.org:
http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/Suelos_LAC_UE.pdf

Consejo nacional de energía, EL Salvador. (s.f.). *Petróleo y sus derivados*. Obtenido de http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=160

Contreras, A., & De La Rosa, R. (2006). *Aplicabilidad de la bioremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en Cartagena*. Universidad de Cartagena, Cartagena.

CORPONOR. (25 de febrero de 2015). *HOJA DE SEGURIDAD*. Obtenido de [corponor.gov.co](http://www.corponor.gov.co):

<http://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/Hojas%20de%20Seguridad/HS%20Gasolina%202015.pdf>

Covo, A. I. (2003). *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS*. Cartagena: UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

DAMA, D. d. (15 de Abril de 1997). *Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente*. Recuperado el 10 de septiembre de 2015, de [alcaldiabogota.gov.co](http://www.alcaldiabogota.gov.co): <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=2707>

Das, B. M. (2001). *PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES*. (cuarta, Ed., & J. d. Alonso, Trad.) Mexico: International Thomson Editores.

Das, Braja M. (1985). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*. (M. Á. Castellano, Ed., & J. d. Cesarea, Trad.) Mexico D.F., Mexico: Thomson Learning.

Djoenaidi, W. (1985). *A Compendium of Soil Properties and Correlations*. Sydney: University of Sydney. Recuperado el 2 de abril de 2017

Dominguez, S. E., & Anaya, G. A. (2008). *SUSCEPTIBILIDAD DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS PARA LA CIUDAD DE CARTAGENA BASADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD PARA COMBUSTIBLES COMO GASOLINA, DIESEL Y QUEROSENO*. Trabajo de Grado, Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Cartagena de Indias (Colombia).

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, I. (21 de Junio de 2000). *NTC 1504 CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS)*. Obtenido de <http://tienda.icontec.org/>: <http://tienda.icontec.org/brief/NTC1504.pdf>

EL Tiempo. (13 de noviembre de 2014). *JUEVES DE MECÁNICA: TOP 10 DE RESPUESTAS SOBRE EL USO DE GASOLINA O DIÉSEL EN LOS VEHÍCULOS*. Obtenido de REDACCIÓN MOTOR: <http://www.eltiempo.com/revista-motor/actualidad/tecnologia/jueves-mecanica-top-10-respuestas-gasolina-diesel-vehiculos/20207>

Elizondo Arrieta, F., Navas Carro, A., & Sibaja Obando, D. (Noviembre de 2009). *Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes*. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/viewFile/7268/6945>

Environmental Protection Agency. (Abril de 1996). *Guía del ciudadano: técnicas de tratamiento innovadoras*. Obtenido de <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/10002PKE.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995%20Thru%201999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField>

ExonMobil. (9 de enero de 2013). *HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL*. Obtenido de [www.grupoestaciones.co: http://www.grupoestaciones.co/images/Corriente.pdf](http://www.grupoestaciones.co/images/Corriente.pdf)

Flores, L. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de física de suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Fonseca, A. M. (2002). *Ingeniería de Pavimento para Carreteras*. Bogotá D.C.: Agora editores.

Fonseca, A. M. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda ed.). Bogotá D.C., Colombia: Agora Editores. Recuperado el 17 de 08 de 2015

Galindo, N. J., & Rueda, C. A. (2012). *caracterizacion mecanica de suelos arcillosos afectados por derrames superficiales de hidrocarburos en concrencion por porcentaje en peso 5,10,15 y 30*. Obtenido de http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/2190/1/digital_23999.pdf

- García, W. R. (1999). *CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS*. Trabajo de Grado, Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Cartagena. Recuperado el 10 de septiembre de 2015
- Gómez, J. P. (Abril de 2010). *Gestión de Residuos Industriales*. Obtenido de ambiente.gov.ar:
<http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/trabajo/file/delegados%20ambientales/Guia-RESIDUOS.pdf>
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN Pag. 2.
- Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá D. C., Colombia: BHANDAR Editores Limitada. Recuperado el 18 de 08 de 2015
- HIDROCARBUROS, A. N. (s.f.). *ANH*. Recuperado el 16 de 08 de 2015, de anh.gov.co:
<http://www.anh.gov.co/la-anh/Paginas/historia.aspx>
- Hossam F. Hassan, R. T. (23 de Marzo de 2005). *Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction*. Obtenido de ELSEVIER:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0950061805000024/1-s2.0-S0950061805000024-main.pdf?_tid=0eee85c4-3f1f-11e5-a6bf-00000aacb361&acdnat=1439184013_d8f2852e438849c65702090b6e441b78
- Huezo, H., & Orellana, A. (2009). *GUIA BÁSICA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL EN CAMINO DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN EL SALVADOR*. San Salvador: Escuela de Ingeniería- Universidad del Salvador . Obtenido de http://ri.ues.edu.sv/2138/1/Gu%C3%ADa_b%C3%A1sica_para_estabilizaci%C3%B3n_de_suelos_de_cal_en_caminos_de_baja_intensidad_vehicular_en_El_Salvador.pdf
- IECA. (2013). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO*. Guías Técnicas, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Madrid. Recuperado el Julio de 2017, de

https://www.ieca.es/Uploads/docs/Estabilizaci%C3%B3n_de_suelos_con_cemento.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (26 de Junio de 2014). “*anti ranking*” de los departamentos con los mayores conflictos de los suelos en Colombia. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de www.igac.gov.co:
http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/c8eb398044ab6ec2bbd1ff9d03208435/I_GAC+revela.pdf?MOD=AJPERES

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2008). *MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Obtenido de INVIAS: http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc_download/3807-manual-de-diseno-de-pavimentos-de-concreto-para-vias-con-bajos-medios-y-altos-volumenes-de-transito

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2007). *ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO*. Obtenido de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-123-07.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. (2012). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá.

Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2007). *CBR de Laboratorio I.N.V E- 148-07*. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de structroad.com:
<http://structroad.com/files/pdfs/norma-inv-e-148-072129141847.pdf>

International Association of Assessing Officers. (Julio de 2001). *Standard on the Valuation of Properties Affected by Environmental Contamination*. Recuperado el 19 de 08 de 2015, de <http://katastar.rgz.gov.rs>: http://katastar.rgz.gov.rs/masovna-procena/Files/12.Standard_Valuation_Properties_Affected_by_Enviromental_Contamination.pdf

- INVIAS. (2007). *CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS I.N.V. E – 151 – 07*. Obtenido de [labsueloscivil.upbbga.edu.co:
http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-151-07.pdf](http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-151-07.pdf)
- INVIAS. (2007). *PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL I.N.V. E 153*. Obtenido de [unicauca.edu.co:
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-153-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-153-07.pdf)
- Jingchun Tanga, X. L. (25 de Enero de 2012). *Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions*. Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0167880912000047/1-s2.0-S0167880912000047-main.pdf?_tid=137590d0-3f18-11e5-ae6e-00000aacb360&acdnat=1439181014_0b5b6a68642f4ce192608f4cc567860d
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *MECÁNICA DE SUELOS* (Segunda ed., Vol. FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE SUELOS). México: LIMUSA.
- Manrique Huevo, H., & Orellana Martínez, A. C. (Febrero de 2009). *GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN EL SALVADOR*.
- Michel, J. K., & Freitag, D. R. (1959). *A Review and Evaluation of Soil-cement Pavements*. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California.
- MININTERIOR, M. D. (17 de 02 de 1999). *minambiente.gov.co*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Decretos/dec_0321_170299.pdf
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, E. Y. (2013). *LA ENERGÍA EN ESPAÑA*. Recuperado el 17 de 08 de 2015, de [minetur.gob.es:
http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_en_espana_2013.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_en_espana_2013.pdf)

- Ministerio de Vivienda de Perú. (08 de Junio de 2006). *CE.020 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES*. Recuperado el 19 de agosto de 2015, de www.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/NORMACE020.pdf
- Ministerio del Interior, M. (28 de 08 de 2013). *asei.com.co*. Recuperado el 16 de 08 de 2015, de http://asei.com.co/files/28_08_2013_02_41_39__upload.pdf
- MINMINAS. (26 de Mayo de 2015). *Ministerio de Minas y Energia [CO]*. Obtenido de Dectero Número 1073: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/170046/Decreto+%F2nico+Reglamento+Sector+Minas+y+Energo92a.pdf/8f19ed1d-16a0-4a09-8213-ae612e424392>
- Mohammad Nazrul Islam, Y.-T. J.-H. (3 de Agosto de 2013). *Remediation of soil contaminated with lubricating oil by extraction using subcritical water*. Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S1226086X13003511/1-s2.0-S1226086X13003511-main.pdf?_tid=f755a74a-3f13-11e5-bd84-00000aab0f27&acdnat=1439179249_bf28097fefaf66ba16b8f183de057180
- Mohammed, H., & Abdullahi, S. (January-February de 2013). Effects of Crude Oil, Low Point Pour Fuel Oil and Vacuum Gas Oil Contamination on the Geotechnical Properties Sand, Clay and Laterite Soils. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3, Issue 1, 1947-1954. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/301292981_Effects_of_Crude_Oil_Low_Point_Pour_Fuel_Oil_and_Vacuum_Gas_Oil_Contamination_on_the_Geotechnical_Properties_Sand_Clay_and_Laterite_Soils
- Mojica, D. M. (2008). *repository.upb.edu.co*. Recuperado el 18 de 08 de 2015, de Evaluación del potencial de biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos ocontaminados procedentes de PetroSantander (Colombia) INC.: http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/67/1/digital_15335.pdf

- Moreno, M. d. (Noviembre de 2009). *Tratamiento de Residuos Industriales* . Salamanca , Universidad de Salamanca , España.
- Nacional Lime Association. (Enero de 2004). *Manual de Estabilización de suelos con Cal*. Obtenido de https://lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf
- National Lime Association. (Enero de 2004). *Manual de Estabilización de suelos con cal*. Obtenido de https://lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf
- Núñez, D. (2011). *Elección y Dosificación de Conglomerante en Estabilización de Suelos*. Ciudad Obregón, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora. Obtenido de http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/317_nunez_dagoberto.pdf
- Ocampo, D., Hernandez, L., Valencia , Y., & Echeverri , O. (2010). Análisis de las alteraciones físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito antioqueño contaminado con gasolina. *XIII Congreso y VII Seminario Colombiano de geotécnia*, (pág. 12). Manizales. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/306254875_Analisis_de_las_alteraciones_fisicas_quimicas_mineralogicas_y_mecanicas_de_un_suelo_residual_de_Batolito_Antioqueno_contaminado_con_gasolina_-_Analysis_of_physical_chemical_mineralogical_and_mechanic_
- Pirson, S. (1965). *Ingeniería de yacimientos petrolíferos* . Barcelona, España: Omega S.A.
- Presidencia de la República. (1 de mayo de 1989). *Diario Oficial 38799*. Obtenido de DECRETO 919 DE 1989: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13549>
- Puerta, C. N. (mayo de 2013). *etsav.upc.e*. Obtenido de URBANISMO E INGENIERÍA AMBIENTAL: <http://www-etsav.upc.es/personals/monclus/cursos/1301.htm>
- Reginald B. Kogbara, A. A.-T. (16 de Febrero de 2013). *Cement-fly ash stabilisation/solidification of contaminated soil: Performance properties and*

initiation of operating envelopes. Obtenido de ELSEVIER:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0883292713000255/1-s2.0-S0883292713000255-main.pdf?_tid=9400592c-3f15-11e5-82e1-00000aab0f6c&acdnat=1439179941_3a03be5e862771021c922f4cd65fef0f

REPSOL YFP. (2002). *El petróleo: el recorrido de la energía.* Obtenido de <http://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-el-petroleo.pdf>

Richard J. Watts, D. R. (28 de Enero de 2000). *A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions.* Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0304389400001734/1-s2.0-S0304389400001734-main.pdf?_tid=0b065ffa-3f19-11e5-8cd6-00000aab0f02&acdnat=1439181429_7b26901bab6a70928a6513dd97f63324

Rojas, J. J. (agosto de 2010). *CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS EN SUELOS COLAPSABLES.* Obtenido de civilgeeks.com:
<http://civilgeeks.com/2011/10/23/caracterizacion-y-ensayos-en-suelos-colapsables/>

S. A. Khan, S. J. (3 de Noviembre de 2014). *EFFECT OF HYDROCARBON CONTAMINATION AND SUBSEQUENT REMEDIAL TREATMENT ON THE ENGINEERING PROPERTIES OF SOIL.* Obtenido de ezproxy.unicartagena.edu.co:
http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2057/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7120243&queryText=effects+of+hydrocarbons+on+soil+properties&newsearch=true&searchField=Search_All

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. (2000). *SEMARNAT.* Recuperado el 18 de 08 de 2015, de <http://www.semarnat.gob.mx/>:
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/img/cap2.pdf

Serigos, P. (2009). *Rigidez a bajo deformación de mezclas de suelos de la formación de Pampeano y CEMENTO pORLAND.* Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Obtenido de http://materias.fi.uba.ar/6408/Tesis_SERIGOS.pdf

- Solís Carcaño, R., Zaragoza Grifé, N., & González Fajardo, A. (2009). La Administración de los Materiales en la Construcción. *Ingeniería Revista Académica*, Vol. 13, Núm. 3, pp. 61-71.
- Solminihac, H., Echeverría, G., & Thenoux, G. (s.f.). *Estabilización Química de los suelos: Aplicación a la construcción de estructuras de pavimentos*. Recuperado el 17 de 08 de 2015, de www.ricuc.cl: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/323/267>.
- Solminihac, H., Echeverría, G., & Thenoux, G. (s.f.). *Estabilización química de suelos: Aplicación a la construcción de pavimentos*. Obtenido de <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/323/267>.
- Somsubhra Chakraborty, D. C. (11 de Febrero de 2015). *Development of a hybrid proximal sensing method for rapid identification of petroleum contaminated soils*. Obtenido de ELSEVIER: http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2149/S0048969715001096/1-s2.0-S0048969715001096-main.pdf?_tid=87920fd0-3f26-11e5-bb59-00000aab0f27&acdnat=1439187222_2130b7c988ca622db6328c1af4373d9a
- Terzaghi, K. V., & Beck, R. P. (1973). *MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA PRACTICA* (Segunda ed.). Barcelona, España: El Ateneo. Recuperado el 17 de 08 de 2015
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics In Engineering Practice* (Tercera ed.). Toronto, Canada: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Torres, R. L. (1998). *ECOLOGÍA Y USOS DE LOS SUELOS*. Recuperado el 10 de 08 de 2015, de www.sogeocol.edu.co: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/Ecologia.pdf>
- Universidad del Atlántico; Universidad Autónoma de Occidente. (09 de agosto de 2015). *AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL REFINO Y PETROQUIMICA*. Obtenido de www.si3ea.gov.co: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/petroleo.pdf>

- Vargas Mesa, J. E. (2009). *EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS AASHTO Y USCS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DEL BARRIO MOCHUELO BAJO EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR -PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARTICULAR*. . Recuperado el 17 de 08 de 2015, de repository.uniminuto.edu.co: http://repository.uniminuto.edu:8080/jspui/bitstream/10656/1391/1/TIC_VargasMesaJuan_2009.pdf
- Vélez Trujillo, D. F. (2013). *PLAN DE DESARROLLO AHORA SÍ CARTAGENA 2013 - 2015*. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de servicios.cartagena.gov.co: <http://servicios.cartagena.gov.co/PlanDesarrollo2013/Documentos/PROYECTODESARROLLOAHORASI.pdf>
- Vélez, D. F. (2013). *PLAN DE DESARROLLO AHORA SÍ CARTAGENA 2013 - 2015*. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de servicios.cartagena.gov.co: <http://servicios.cartagena.gov.co/PlanDesarrollo2013/Documentos/PROYECTODESARROLLOAHORASI.pdf>
- Vidal, M. (30 de Septiembre de 2011). Ronald Pantin : "En Colombia queda mucho petroleo por descubrir". *REVISTA Credencial* . Recuperado el 14 de 08 de 2015, de Ronald Pantin : "En Colombia queda mucho petroleo por descubrir": <http://www.revistacredencial.com/credencial/content/ronald-pantin-%E2%80%9Cen-colombia-queda-mucho-petr%C3%B3leo-por-descubrir%E2%80%9D>
- Wauquier, J.-P. (1994). *El refinio del petróleo*. París, Francia: Diaz de santos. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=dwkg8u2MmIC&pg=PA448&lpg=PA448&dq=petroleum+refiner+edmister&source=bl&ots=eBkSSxJer5&sig=j6fI_preiZzOwpJzik4VrmOB7eU&hl=es-419&sa=X&ved=0CDIQ6AEwAWoVChMI4Y2CgN24xwIVg5UeCh3WCg3i#v=onepage&q&f=true
- Wicander, R., & Monroe, J. S. (2000). *FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA* (Segunda ed.). (E. Palos, Trad.) México D.F., México: Thomson Editores.

GLOSARIO

BIOREMENDACIÓN: Proceso que utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural. La biorremediación puede ser empleada para atacar contaminantes específicos del suelo, por ejemplo, en la degradación bacteriana de compuestos organoclorados o de hidrocarburos.

DEGRADACIÓN: Disminución gradual de cualidades o características.

DENSIDAD ABSOLUTA: Se define como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa única y exclusivamente la masa sólida, ósea que se excluyen los todos los poros, saturables y no saturables.

DENSIDAD APARENTE: Está definida como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros saturables y no saturables.

DENSIDAD NOMINAL: Se define como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos los poros no saturables.

DESORCIÓN: Fenómeno por el cual un gas abandona un sólido cuando este alcanza cierta temperatura.

EROSIÓN: Procesos naturales de naturaleza física que desgastan y destruyen las rocas de la corteza de un planeta, en este caso, de la Tierra.

ESFUERZO CORTANTE: es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar.

ESFUERZO NORMAL: es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones perpendiculares (normales) a la sección transversal de un prisma mecánico. Este tipo de sollicitación formado por tensiones paralelas está directamente asociado a la tensión normal.

INTEMPERISMO: Intemperismo o meteorización es la disgregación o descomposición de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad, la temperatura y al efecto de la materia orgánica.

LIXIVIACIÓN: Extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

MASA UNITARIA COMPACTA: Relación que existe el peso de un material y el volumen que ocupa en un recipiente de dimensiones conocidas, luego de aplicar un procedimiento de vibrado.

MASA UNITARIA SUELTA: Relación que existe el peso de un material y el volumen que ocupa en un recipiente de dimensiones conocidas, sin haber sido sometido a una vibración.

MINERAL: Sustancia natural, sólida, homogénea, inorgánica, de composición química definida (dentro de ciertos límites). Posee una disposición ordenada de átomos de los elementos de que está compuesto, y esto da como resultado el desarrollo de superficies planas, conocidas como caras. Si el mineral ha crecido sin interferencias, pueden generarse formas geométricas características, conocidas como cristales.

PERMEABILIDAD: Medida de la facilidad que posee una sustancia de permitir el paso de líquido a través de él.

PLASTICIDAD: Propiedad mecánica de un material inelástico, natural, artificial, biológico o de otro tipo, de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico, es decir, por encima de su límite elástico.

POROSIDAD: La medida de los espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100%. El término se utiliza en varios campos, incluyendo farmacia, cerámica, metalurgia, materiales, fabricación, ciencias de la tierra, mecánica de suelos e ingeniería.

SUSTANCIA HIDRÓFOBA: Sustancia que no se puede mezclar con agua o es repelida por ésta.