

**IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA E HIDRÁULICA DE LA
FASE SÓLIDA ARCILLOSA DE TRES SUELOS CON PROPIEDADES
VÉRTICAS EN LOS MUNICIPIOS DE COROZAL Y SINCELEJO
(DEPARTAMENTO DE SUCRE)**

**BLAS JOSÉ DÍAZ SALGADO (Q.E.P.D.)
LUIS ARLEY NÚÑEZ HERAZO**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
SINCELEJO
2006**

**IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA E HIDRÁULICA DE LA
FASE SÓLIDA ARCILLOSA DE TRES SUELOS
CON PROPIEDADES VÉRTICAS EN LOS MUNICIPIOS DE COROZAL Y
SINCELEJO (DEPARTAMENTO DE SUCRE)**

**BLAS JOSÉ DÍAZ SALGADO (Q.E.P.D.)
LUIS ARLEY NÚÑEZ HERAZO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero agrícola**

Director

**HERALDO ALVIZ SANTOS
Ingeniero Agrícola
Especialista en Manejo de Suelos y Aguas
Msc Ciencias Agrarias: suelos**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
SINCELEJO
2006**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Sincelejo, Marzo de 2006

DEDICATORIA

- *A Dios,*

Por la fortaleza que me ha dado para vencer los obstáculos, por darme la esperanza, la fe, el amor y la sabiduría para poder lograr todas las metas.

- *A mis padres, Luís y Magaly*

Quienes siempre han creído en mí y me han apoyado en la realización de mis sueños.

- *A mi esposa, Ana*

Por su gran amor, paciencia y apoyo incondicional, por ser quien siempre ha estado a mi lado en los malos y buenos momentos.

- *A mis hermanos Floralba, Ferney y Beatriz*

Por la comprensión y ayuda en todo momento, por compartir las alegrías y tristezas en nuestras vidas.

- *A mis hijas Andrea y Jimmy*

Quienes con su ternura y dulzura se convierten en mi principal motivación y en el foco de mi superación.

- *A mi amigo ,Ingeniero Agrícola , Blas J. Díaz (Q.E.P.D.)*

Por ser un líder, amigo incondicional y quien con su esfuerzo y sacrificio hizo de este gran sueño una realidad, quien compartió conmigo en los buenos y en los malos momentos, durante toda nuestra carrera universitaria.

Luís Arley

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

DIOS, con su omnipotencia divina

HERALDO ÁLVIZ SANTOS, Ingeniero Agrícola, Msc suelos, docente de la Universidad de Sucre, por su apoyo, amistad y acertada orientación en la dirección del trabajo.

ANTONIO TOVAR ORTEGA, Ingeniero Agrícola, director del Centro de Laboratorios de la Universidad de Sucre, y coordinador del Laboratorio de Suelos y Aguas.

WILLIAM VILLA PEREIRA, Ingeniero Civil, Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad de Cartagena.

HERNÁN RAMOS VILLAMIL. Ingeniero civil, Jefe del laboratorio Ingeniería e Investigaciones.

LUIS TOSCANO, Ingeniero Agrícola, adscrito al Laboratorio de Geotecnia y JOSÉ ARRIETA, tecnólogo, vinculado al Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Sucre.

Todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
2. MARCO CONCEPTUAL.....	20
2.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS ARCILLAS.....	20
2.1.1 Definición de arcilla.....	20
2.1.2 Importancia.....	21
2.1.3 Propiedades de los coloides arcillosos.....	22
2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SUELOS.....	22
2.3 PROPIEDADES MINERALÓGICAS DE LOS SUELOS.....	22
2.3.1 Fracción arcilla de los suelos.....	22
2.3.1.1 Definición.....	23
2.3.1.2 Identificación de los minerales arcillosos en la zona.....	23
2.4 PROPIEDADES ÍNDICES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS.....	23
2.4.1 Propiedades índices de los suelos.....	24
2.4.2 Propiedades mecánicas e hidráulicas.....	25
2.4.3 Descripción de propiedades.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	39
3.1.1 Trabajo de Campo.....	39
3.1.2 Trabajo de Laboratorio.....	39
3.2 MODELO METODOLÓGICO.....	41
3.2.1 Descripción de las áreas de estudio.....	41
3.2.2 Trabajo de campo.....	45
3.2.3 Trabajo de laboratorio.....	46
3.2.4 Trabajo de oficina.....	47
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	49
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE SUELOS.....	49
4.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS PRESENTES EN LOS SUELOS.....	52

4.3 PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DE LOS SUELOS.....	54
4.3.1 Contenido de humedad.....	56
4.3.2 Relación de vacíos y porosidad.....	58
4.3.3 Peso unitario.....	58
4.4 ANALISIS GRANULOMETRICO.....	61
4.5 CONSISTENCIA.....	63
4.6 CLASIFICACIÓN U.S.C Y A.A.S.H.T.O DE LOS SUELOS.....	68
4.7 RELACIONES HUMEDAD – DENSIDAD (COMPACTACIÓN).....	70
4.8 CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS.....	75
4.8.1 Curvas que relacionan la oquedad con los esfuerzos.....	76
4.8.2 Presión de preconsolidación.....	77
4.8.3 Curvas de consolidación-tiempo.....	78
4.8.4 Asentamiento (S), coeficiente de compresibilidad (a_v) y módulo edométrico (m_v) de los suelos.....	81
4.8.5 Tiempo y coeficiente de consolidación para 50% y 90% de consolidación.....	83
4.9 ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS.....	87
4.10 COMPRESIÓN INCONFINADA.....	92
4.11 ENSAYO DE SOPORTE DE CALIFORNIA C.B.R.....	96
4.12 CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA (K).....	105
CONCLUSIONES.....	107
RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFICAS.....	113
ANEXOS.....	115

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Perfil estratigráfico. Suelo La Huerta (Corozal).....	50
Cuadro 2. Perfil estratigráfico. Suelo Tuza (Corozal).....	51
Cuadro 3. Perfil estratigráfico. Suelo Puerta Roja (Corozal).....	53
Cuadro 4. Constitución mineralógica de la fracción arcilla de los sólidos.....	55
Cuadro 5. Resultados de algunos parámetros del análisis por tamizado y sedimentación de los suelos.....	61
Cuadro 6. Límite líquido (L.L.), límite plástico (L.P.), índice de plasticidad (I.P.) de los suelos.....	63
Cuadro 7. Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) y módulo de ruptura de los suelos.....	65
Cuadro 8. Algunos parámetros y calificativos de los suelos derivados de los límites de Atterberg.....	66
Cuadro 9. Clasificación U.S.C y A.A.S.H.T.O de los suelos.....	69
Cuadro 10. Densidad seca máxima, γ_d , y contenido de humedad óptimo, C.H.O, de los suelos.....	71
Cuadro 11. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo La Huerta.....	80
Cuadro 12. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo Tuza.....	80
Cuadro 13. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo Puerta Roja.....	80
Cuadro 14. Asentamientos (S), Coeficientes de compresibilidad (a_v) y módulo edométrico (m_v). Suelo La Huerta.....	82
Cuadro 15. Asentamientos (S), Coeficientes de compresibilidad (a_v) y módulo edométrico (m_v). Suelo Tuza.....	82

Cuadro 16. Asentamientos (S), Coeficientes de compresibilidad (a_v) y módulo edométrico (m_v). Suelo Puerta Roja.....	82
Cuadro 17. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (C_v) para el 50% y 90% de consolidación. Suelo La Huerta.....	84
Cuadro 18. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (C_v) para el 50% y 90% de consolidación. Suelo Tuza.....	84
Cuadro 19. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (C_v) para el 50% y 90% de consolidación, suelo Puerta Roja.....	84
Cuadro 20. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo La Huerta.....	86
Cuadro 21. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo Tuza.....	86
Cuadro 22. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo Puerta Roja.....	86
Cuadro 23. Resistencia a la compresión simple (q_u) y cohesión (C). Muestras alteradas e inalteradas de los suelos.....	93
Cuadro 24. Relación de Soporte California (CBR) y parámetros asociados.....	97
Cuadro 25. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo La Huerta.....	102
Cuadro 26. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo Tuza.....	95
Cuadro 27. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo Puerta Roja.....	102
Cuadro 28. Conductividad hidráulica, K, de los suelos.....	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Localización de perfiles representativos.....	45
Tabla 2. Método de análisis mineralógico.....	46
Tabla 3. Métodos, normas y códigos de las determinaciones físicas.....	47
Tabla 4. Contenido de humedad, pesos unitarios y gravedad específica de los sólidos.....	56
Tabla 5. Carga de preconsolidación de los suelos.....	78
Tabla 6. Cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ) y ecuación de corte.....	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Arcilla 2:1 cuarteada.	21
Figura 2. Localización departamental de áreas de estudio	42
Figura 3. Localización municipal de áreas de estudio. Sincelejo.....	43
Figura 4. Localización municipal de áreas de estudio. Corozal.....	44
Figura 5. Perfil del suelo La Huerta (Corozal).....	50
Figura 6. Perfil del suelo Tuza (Corozal).....	51
Figura 7. Perfil del suelo Puerta Roja (Sincelejo).....	53
Figura 8. W (%) vs. profundidad. Suelo La Huerta.....	57
Figura 9. W (%) vs. profundidad. Suelo Tuza.....	57
Figura 10. W (%) vs. profundidad. Suelo Puerta Roja.....	57
Figura 11. Variaciones del peso unitario húmedo (γ_h) de los suelos.....	58
Figura 12. Variaciones del peso unitario seco (γ_d) de los suelos.....	59
Figura 13. Gravedad específica de los sólidos (G_s) del horizonte seleccionado en cada suelo.....	60
Figura 14. Curva granulométrica. Suelo La Huerta (57- 85 cm.).....	62
Figura 15. Curva granulométrica. Suelo Tuza (31- 68 cm.).....	62
Figura 16. Curva granulométrica. Suelo Puerta Roja (30 - 51 cm.).....	62
Figura 17. Limite líquido (L.L), limite plástico (L.P), e índice de plasticidad (I.p) de los suelos.....	63
Figura 18. Curvas de compactación de los suelos, a 25 golpes.....	72

Figura 19. Curvas de compactación de los suelos, a 55 golpes.....	73
Figura 20. Contenido de humedad óptimo (C.H.O), a 55 y 25 golpes.....	74
Figura 21. Densidad seca máxima, (KN/m^3), a 55 y 25 golpes.....	74
Figura 22. Curvas relación de vacíos vs. presión.....	76
Figura 23. Curvas semilogarítmicas de relación de vacíos vs. Presión.....	77
Figura 24. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelos La Huerta.....	88
Figura 25. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelos Tuza.....	88
Figura 26. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelo Puerta Roja.....	88
Figura 27. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo La Huerta.....	90
Figura 28. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo Tuza.....	90
Figura 29. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo Puerta Roja.....	91
Figura 30. Relaciones esfuerzo-deformación de los suelos inalterados.....	95
Figura 31. Relaciones esfuerzo-deformación de los suelos alterados.....	95
Figura 32. γ_d vs. W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo La Huerta.....	98
Figura 33. γ_d vs W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo Tuza.....	98
Figura 34. γ_d vs W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo Puerta Roja.....	99
Figura 35. Expansión promedia según golpes/capa.....	100
Figura 36. Curvas esfuerzo-penetración, suelo La Huerta.....	100
Figura 37. Curvas esfuerzo-penetración, suelo Tuza.....	101
Figura 38. Curvas esfuerzo-penetración, suelo Puerta Roja.....	101
Figura 39. Selección del C.B.R de diseño, Suelo La Huerta.....	104

Figura 40. Selección del C.B.R de diseño, Suelo Tuza.....	104
Figura 41. Selección del C.B.R de diseño, Suelo Puerta Roja.....	104

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resultados de análisis mineralógico de arcillas arenas	115
Anexo 2. Resultados de las propiedades granulométricas y volumétricas, parámetros de consistencia y COLE de los suelos	118
Anexo 3. Resultados de análisis granulométrico	144
Anexo 4. Resultados del modulo de ruptura	151
Anexo 5. Resultados del ensayo de compactación	153
Anexo 6. Resultados del la consolidación de los suelos	166
Anexo 7. Resultados del ensayo de esfuerzo cortante	182
Anexo 8. Resultados del ensayo de compresión incónfinada	195
Anexo 9. Resultados del ensayo de C.B.R	205
Anexo 10. Resultados del ensayo de conductividad hidráulica	215

RESUMEN

La presente investigación, de carácter exploratorio, se realizó en tres suelos, localizados en predios de los municipios de Corozal y Sincelejo, departamento de Sucre (Colombia). Tuvo como objetivo general Identificar y caracterizar físicamente la fase sólida arcillosa de los suelos finos.

La metodología utilizada consistió primeramente en identificar a través de rayos X el tipo de arcillas esmectíticas predominantes en un horizonte seleccionado de cada perfil, posteriormente, con muestras inalteradas y remoldeadas, se llevó a cabo la caracterización física, utilizando procedimientos normativos establecidos.

En la fracción fina arcillosa predomina la montmorillonita, con porcentajes menores de materiales micáceos, y en algunos casos caolinita transportada. Razón que obligo clasificar los materiales como CH y A-7-6 (20) según la U.S.C y la A.A.S.H.T.O. respectivamente. Las relaciones gravimétricas y volumétricas son típicas de los suelos, destacándose un contenido de humedad, pesos unitarios porosidad, oquedad y gravedad específica dependientes en un gran porcentaje de la estructura cristalina de arcillas 2:1 expansivas.

Las características de consistencia reflejadas por alto límite líquido, alto límite plástico y alto índice de plasticidad muestran que las propiedades mecánicas y esfuerzo-deformación son de manejo ingenieril cuidadoso sobre todo cuando los suelos tienen contenidos de humedad altos, y el flujo del agua es muy lento.

Estos materiales, de vasta ocurrencia en el área, si van a ser utilizados como subestructuras deben ser estabilizados, y en el caso de vías pueden ser colocados como materiales de sub rasantes dispuestos con un manejo adecuado.

SUMMARY

The present investigation, of exploratory character, one carries out in three soils, located in farms of the municipalities of Corozal and Sincelejo, department of Sucre (Colombia). he had as general objective to Identify and to characterize the loamy solid phase of the fine soils physically.

The methodology used consisted firstly on identifying through rays X the type of clays smectitics predominant in a selected horizon of each profile, later on, with unaffected and reformed samples; it was carried out the physical characterization, using established normative procedures.

In the loamy fine fraction the montmorillonita prevails, with percentages smaller than materials with micas and in some cases transported caolinita. Reason that I force to classify the materials as CH and TO-7-6 (20) according to the U.S.C and the A.A.S.H.T.O. respectively. The relationships gravimetric and volumetric they are typical of the floors, standing out a content of humidity, pesos unitary porosity, hollow and graveness specific clerks in a great percentage of the crystalline structure of clays 2:1 expansible.

The characteristics of consistency reflected for high limit I liquidate, high it limits plastic and high index of plasticity they show that the mechanical properties and effort-deformation are mainly of careful engineering handling when the floors have high contents of humidity, and the flow of the water is very slow.

These materials, of vast occurrence in the area, if they will be used ace sub structures they should be stabilized, and in the marries of roads they dog be placed ace materials of sub level willing with an appropriate handling.

INTRODUCCIÓN

El Departamento de Sucre forma parte de la extensa Llanura del Caribe o Llanura Atlántica. Un examen más detallado de su geomorfología permite distinguir en este departamento, entre otras, dos subdivisiones fisiográficas denominadas Montes de María y Sabanas, donde se encuentran localizadas las ciudades de Corozal y Sincelejo respectivamente. La región de Sabanas constituye el declive general de los Montes de María hacia la depresión del Bajo Cauca y San Jorge.

Dentro del área de las dos ciudades mencionadas imperan geológicamente areniscas calcáreas intercaladas con arcillolitas. La condición anterior aunada al hecho de que en ésta región natural existe una relación muy marcada y notoria entre los factores formadores de suelos, refleja la existencia de pedos con predominio global de la fracción arcillosa en el perfil y manifestadas características vérticas que los hacen difícil de usar ingenierilmente.

Comúnmente se desconocen los efectos que éstos minerales pueden tener en las construcciones y son pocos y puntuales los estudios de suelos realizados que dan información y recomendaciones adecuadas sobre ellos. Se requiere mayor investigación al respecto para robustecer el paquete tecnológico asociado con el uso ingenieril de estos suelos.

Es decir, cobran validez unas justificaciones teóricas que argumentan el deseo de verificar y aportar aspectos teóricos sobre este tipo de arcillas, y los suelos que forman, además, su investigación ayudará a la solución de problemas prácticos cuando se usen en proyectos edafológicos y de la mecánica de suelos.

El presente trabajo esta encaminado a realizar a nivel exploratorio una caracterización mecánica e hidráulica muy completa de tres tipos de materiales arcillosos presentes en el perfil de tres suelos pertenecientes al orden vertisol situados en zonas de expansión urbana de las ciudades de Corozal y Sincelejo.

Este trabajo hace parte de una macro investigación titulada “Génesis y caracterización química, física, mecánica e hidráulica de la fase sólida arcillosa de tres suelos con propiedades vérticas del Departamento de Sucre” presentado como trabajo de grado para optar el título de Magíster de Ciencias Agrarias, con énfasis en suelos, por parte del director de este trabajo, Ingeniero Heraldo Alviz Santos en el Centro de Postgrados de la Universidad Nacional de Palmira.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar y caracterizar desde el punto de vista mecánico e hidráulico los minerales arcillosos presentes en tres suelos con características vérticas de los Municipios de Corozal y Sincelejo (Dpto. de Sucre.). Lo que contribuirá a un mejor conocimiento de las propiedades y a la planeación del uso y manejo ingenieril.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar los minerales arcillosos presentes en los tres suelos escogidos.

Caracterizar mecánicamente los minerales arcillosos que integran la fase sólida de los suelos seleccionados.

Caracterizar hidráulicamente los minerales arcillosos que integran la fase sólida de los suelos seleccionados.

Contribuir al fortalecimiento del conocimiento científico y tecnológico asociado con los materiales arcillosos y su uso ingenieril.

2. MARCO CONCEPTUAL

La investigación realizada tomo en cuenta los siguientes conocimientos previamente contruidos.

2.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS ARCILLAS

2.1.1 Definición de arcilla. Según Malagón, 1975, los minerales arcillosos provienen de minerales primarios, cuyos residuos se rearreglan estructuralmente para conformar un cuerpo mineralógico cristalino, con características coloidales y de tamaño menor de 2 micras denominada arcilla. Moore y Reynolds, 1989, definen los minerales arcillosos como Aluminio–Silicatos hidratados que son clasificados como filosilicatos o silicatos laminares, dentro de los cuales existe una variabilidad considerable de propiedades físicas y químicas, pero se mantiene en común una morfología laminar y un clivaje perfecto (con tamaño de 001μ), consecuencias de sus estructuras atómicas laminares.

La palabra arcilla presenta diferentes significados entre los cuales los más comunes son:

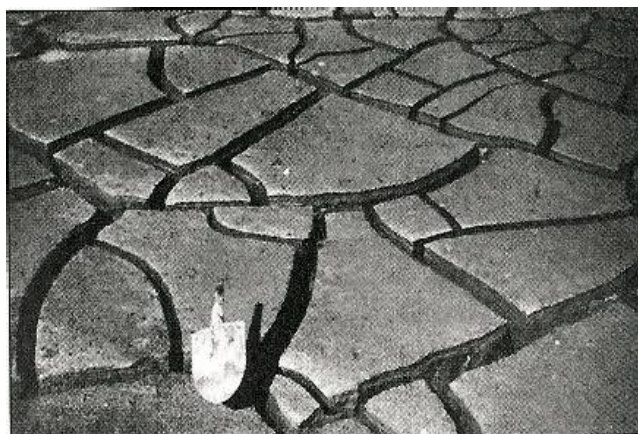
- Significado usual: constituyente plástico y moldeable llamado en otros casos tierra gredosa o greda.
- *Significado petrográfico:* roca plástica en estado húmedo (arcillolita), integrada por elementos clásticos finos, con diámetros comprendidos entre 2 y 4 micrones.
- Significado mineralógico: mineral aluminio – silicatado, con grado variable de hidratación y estructura microcristalina.

- Significado granulométrico: definido según el criterio específico utilizado. Para las clasificaciones norteamericana e internacional, el límite máximo se encuentra en el diámetro de 2μ , no obstante, algunas clasificaciones geológicas consideran diámetros de 4μ como límite máximo.

2.1.2 Importancia. Según Porta, López y Roquero, 1994, una de las principales importancias de las arcillas es la gran influencia que tienen sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos como consecuencia de su pequeño tamaño de partículas y los elementos que la conforman, alta superficie específica y sus propiedades para intercambiar cationes.

Según Malagón, 1975, debido a sus características de expansión y contracción, las arcillas influyen en las características físicas del suelo; la porosidad (macro y micro porosidad), permeabilidad, infiltración, difusividad térmica, capacidad de aire, densidad, etc., se ven afectados grandemente por el contenido arcilloso presente en el suelo. (Ver figura 1).

Figura 1. Arcilla 2:1 cuarteada.



Fuente: Plasters, 1997. Citado por Zarza, 2005

2.1.3 Propiedades de los coloides arcillosos. Según Malagón, 1995, las propiedades de las arcillas están directa e indirectamente relacionadas con su estructura. Dichas propiedades pueden utilizarse en su propia identificación o en la predicción de su conducta en un medio determinado.

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SUELOS

Morelo y Díaz, 1.983, indican que al sur de Corozal (Departamento de Sucre), especialmente entre 120 y 160 m.s.n.m., localizados en todos los lechos y diques de la mayoría de los arroyos que surcan la planicie fluvio-lacustre y dentro del clima y relieve plano a plano cóncavo; con pendientes de 0-3%, se encuentran suelos arcillosos a arcillo-limosos, superficiales a moderadamente profundos, limitados por el nivel freático fluctuante y arcillas compactadas. El drenaje es moderado a pobre.

El perfil modal es pesado con texturas arcillosas dominantes. Los horizontes presentan color gris muy oscuro y gris oscuro en profundidad con manchas de color pardo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro. En los suelos se destaca la presencia de un horizonte B de 75 a 80 cm. de espesor, con abundantes cutánes en las caras verticales y horizontales de los peds, grandes y abundantes superficies de deslizamiento. Los suelos presentan grietas de 2 a 5 cm. de ancho y más de 120 cm. de profundidad que se abren en verano y se cierran en invierno.

2.3 PROPIEDADES MINERALÓGICAS DE LOS SUELOS

2.3.1 Fracción arcilla de los suelos. Se hace necesario tener en cuenta lo siguiente:

2.3.1.1 Definición. En sentido mineralógico las arcillas corresponden a todos los

filosilicatos secundarios que tienen un tamaño de grano menor de 2μ , producto de la meteorización. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en la fracción arcillosa (ante todo de los suelos) se involucran minerales que no son filosilicatos pero son silicatos, también compuestos amorfos, órgano-metálicos y otros (Malagón, et al, 1.995).

2.3.1.2 Identificación de los minerales arcillosos en la zona. La correcta identificación de estos minerales puede conseguirse con una adecuada combinación de métodos, para lo cual se requieren conocimientos tanto de los métodos de determinación en sí como del propio suelo, tales como características de su génesis y evolución, desarrollo de sus propiedades químicas y físicas (Rojas, 1.995).

Pulido, 1.983, estudiando la mineralogía de los suelos en la zona, encontró la constitución, en más del 50% de montmorillonita, en la fracción arcilla; seguida de caolinita y cuarzo, entre 5 y 15%, y trazos de minerales ínter-estratificados. También, Álvarez y Hernández, 1.998, detectaron la presencia de vermiculita. El segundo investigador referenciado resalta la muy alta capacidad para contraerse y expandirse de las arcillas, lo cual propicia agrietamientos amplios del suelo, la estructuración deficiente, la macro porosidad reducida, la infiltración y permeabilidad deficientes, la cohesión y adhesión muy altas.

2.4 PROPIEDADES ÍNDICES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS

Según Montenegro y Malagón, 1.990, el suelo es la resultante de numerosas interacciones dinámicas de componentes orgánicos como inorgánicos, de cuya integración se deriva este cuerpo natural.

El comportamiento mecánico de la fase sólida determina, a su vez, las propiedades físicas del suelo. Estas deben ser entendidas en conjunto, interdependientemente y formando un todo armónico ya que entre ellas se establece una íntima relación.

Los mencionados autores sostienen que las propiedades índices físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo, juegan un papel fundamental en la planeación y desarrollo de obras de ingeniería.

2.4.1 Propiedades índices de los suelos. Según Terzaghy y Peck, 1.973, uno de los principales propósitos perseguidos en los esfuerzos recientes para reducir los riesgos inherentes a todo trabajo de suelos ha consistido en buscar métodos para diferenciar los distintos tipos de suelos de una misma categoría. Las propiedades en que se basa dicha diferenciación se conocen con el nombre de propiedades índice y los ensayos necesarios para determinarlas ensayos de clasificación.

El comportamiento de los suelos en el terreno depende no sólo de las propiedades significativas de los granos de su masa, sino que también de aquellas propiedades que tienen su origen en el acomodamiento de las partículas dentro de ella. De ahí que resulte conveniente dividir las propiedades índices en dos clases: propiedades de los granos del suelo y propiedades de los agregados del suelo.

Según Terzaghy y Peck, 1.973, las principales propiedades índices de los granos del suelo son la forma y el tamaño, y en los suelos arcillosos, las características mineralógicas de las partículas más pequeñas, aquí es de interés el análisis granulométrico. Las propiedades índices más significativas de los agregados del suelo son a su vez las siguientes: para los suelos sin cohesión, la densidad relativa y, para los suelos con cohesión, la consistencia.

2.4.2 Propiedades mecánicas e hidráulicas. La mecánica de suelos práctica está basada principalmente en la experiencia. Se reconoce que no se alcanzó mayor progreso hasta que el cúmulo de experiencia adquirida no fue fertilizado con el aporte de la ciencia aplicada, que tuvo por función revelar las relaciones existentes entre los fenómenos y sus causas.

Para establecer estas relaciones fue indispensable investigar las propiedades físicas de los diferentes tipos de suelos, de la misma manera que, en el estudio de la estabilidad de las construcciones, fue necesario investigar las propiedades del acero y del hormigón. En la mayoría de los casos prácticos, se considera que los últimos materiales citados están suficientemente descritos cuando se conocen la resistencia y el módulo de elasticidad. En el caso de los suelos, el problema es algo más complicado y muchas veces es necesario conocer varias propiedades distintas. De ellas, las más importantes son: la permeabilidad, la compresibilidad, la resistencia a la rotura, la resistencia a la fluencia lenta y la relación esfuerzo-deformación.

2.4.3 Descripción de propiedades. Se tuvieron en cuenta las siguientes:

- **Color.** Según Montenegro y Malagón, 1.990, el color es la característica del suelo más obvia y fácil de determinar. Guarda relaciones con la temperatura, la humedad, la cantidad de materia orgánica, el clima, los organismos y, en muchos aspectos, sirve para juzgar globalmente la fertilidad del suelo.

Ramos, 1.992, realizando estudios en el área encontró colores negros hasta una profundidad de 2 metros; Álvarez y Hernández, 1.998, describieron colores pardo claros, amarillo claros y pardo oscuros. Gama de colores oscuros detectaron Morelo y Díaz, 1.983, como se anotó anteriormente.

Konhke, 1.968, opina que el color del suelo está compuesto del color de sus componentes. Las arcillas presentan colores grises, negro y rojo, los cuales están influenciados por el tipo y cantidad del hierro presente.

- **Granulometría.** El término textura hace referencia a la proporción relativa en que se encuentran, en una masa de suelo, varios grupos de granos individuales asociados por tamaño. Se refiere específicamente a las proporciones relativas de las partículas o fracciones de arena, limo y arcilla en la tierra tamizada y con diámetro inferior a 2 mm.

Estudios realizados por Alviz et al, 1.988, y Morelo y Díaz, 1.983, dan cuenta de las características pesadas de los suelos del área de estudio.

Por otro lado, se llama análisis granulométrico al proceso de determinación de la proporción en que entren los distintos tamaños de granos presentes en un suelo dado (Cárdenas, 1.983).

Álvarez y Hernández, 1.998, indican al respecto que los suelos en la zona de estudio presentan materiales que pasan la malla 200 en 81%, con curvas granulométricas indicativas de la alta uniformidad y baja gradación.

- **Humedad natural.** Es la relación, en porcentaje, del peso del agua que contiene el suelo al peso de los sólidos. Álvarez y Hernández, 1.998, describiendo perfiles arcillosos, durante la época invernal encontraron porcentaje de humedad natural que variaron entre 26 y 38%, hubo variaciones, según la granulometría de la estratigrafía encontrada y la incidencia de las precipitaciones ocurridas evidenciada por los mayores porcentajes de humedad superficialmente.

- **Densidad de los sólidos.** Se define la densidad de la fase sólida del suelo como la relación entre el peso de los sólidos y el volumen de los sólidos. (Juárez y Rico, 1.999). La densidad de los minerales dominantes en el suelo (cuarzo, feldespatos) es alrededor de $2,65 \text{ gr./cm}^3$; en consecuencia, los suelos minerales presentarán valores cercanos al guarismo mencionado.

Rodríguez, 1.983, indica que la densidad real o de los sólidos del suelo en la mayor parte de los casos es cercana a $2,65 \text{ gr./cm}^3$; si el suelo es rico en carbonatos, la densidad descende a $2,50 \text{ gr./cm}^3$ y aún más en presencia de materia orgánica, pudiendo alcanzar valores cercanos a 2 gr./cm^3 .

- **Peso unitario.** En mecánica de suelos el término peso unitario se define como la relación entre el peso total de la masa de suelo (sólidos más agua) y su volumen total (sólidos más vacíos).

Dependiendo de los contenidos de humedad presentes se puede llamar peso unitario saturado, peso unitario húmedo y peso unitario seco (Cárdenas, 1.983). Este autor indica que la densidad saturada para arcillas blandas montmorilloníticas presenta valores de $1,27 \text{ gr./cm}^3$. Álvarez y Hernández, 1.998, estimaron valores para arcillas de la zona de estudio de $1,8 \text{ gr./cm}^3$ para condición saturada, $1,75 \text{ gr./cm}^3$ para estados húmedos y $1,32 \text{ gr./cm}^3$ para los materiales secos, y observaron el incremento del peso unitario húmedo con la profundidad.

Por su parte Montenegro y Malagón, 1.990, dicen que la densidad aparente es una resultante de la relación masa a volumen, incluyendo en este último el volumen total de espacios porosos. En los suelos arcillosos éste parámetro puede ser tan bajo como $1,1 \text{ gr./cm}^3$. La densidad aparente en seco es afectada por las características de expansión y contracción.

- **Porosidad y relación de vacíos.** En opinión de Juárez y Rico, 1.999, se llama porosidad de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa. Los mismos autores definen la relación de vacíos, oquedad o índice de poros a la relación entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos de un suelo. Para la porosidad, los valores reales suelen oscilar entre 20 y 95%, la relación de vacíos no alcanza valores mayores que 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles. Cárdenas, 1.983, presenta valores para arcillas duras de 37% y 0,6 para la porosidad y relación de vacíos respectivamente.

Rodríguez, 1.983, indica que la porosidad total corresponde al volumen de espacios vacíos, expresados en porcentajes del volumen total del suelo, después de evacuados los excesos de humedad. Dicha porosidad está conformada por la microporosidad, responsable de la retención de agua y por la macroporosidad ocupada por el aire del suelo. En los suelos de la zona se presentan valores entre 36% y 53%, los cuales están dominados por la microporosidad, ocasionando déficit de oxígeno para las plantas, sobre todo en periodos lluviosos.

- **Grado de saturación de agua y grado de saturación de aire.** El grado de saturación de agua se define por la relación entre el volumen de agua en el suelo y el volumen de vacíos o de poros; mientras que el grado de saturación de aire es la relación entre el volumen de aire que tiene el suelo y el volumen de vacíos (Bowles, 1.980).

Ambos parámetros se pueden expresar porcentualmente; cuando el grado de saturación de agua es de 0% el suelo está seco, o sea, que está 100% saturados de aire. Juárez y Rico, 1999, opinan que el grado de saturación de aire es una magnitud de escasa importancia práctica.

- **Consistencia.** Estudiada a partir de los límites de Atterberg y algunos parámetros derivados de ellos.

Álvarez y Hernández, 1.998, investigando algunas arcillas 2:1 vermiculíticas en la ciudad de Sincelejo encontraron valores de límite líquido de 60,83% el cual está en el rango establecido para suelos arcillosos e indica que hay una alta compresibilidad; se anota que las arcillas serán pobres para fines ingenieriles, ya que poseen gran potencial de expansión y contracción. El límite plástico es de 30,72% que está en el límite superior del rango establecido para suelos arcillosos, entre 5 y 30%.

Los relacionados investigadores también estimaron el índice de plasticidad de 30,11%, el cual sugiere que los suelos son arcillosos, altamente plásticos y adhesivos, de baja permeabilidad y alta resistencia en estado seco. Estimativos del índice de fluidez de 6,8% y del índice de consistencia de 93,25 calculado en función del contenido de humedad natural de los suelos, indican características de consistencia en estado plástico firme y una resistencia a la compresión axial entre 1 y 5 Kg./cm². El material arcilloso tiene un potencial de expansión alto, con contracción lineal mayor que 12%, lo cual también se ve reflejado en los datos arrojados por el COEL, 0,15, que también califican los suelos con un alto grado de expansión – contracción explicable por la naturaleza arcillosa 2:1. La actividad de las arcillas presentó valores numéricos de 1, 29, índice de arcillas 2:1 activas.

Alviz, et al, 1.988, encontraron arcillas, entre 35 y 70 cm. de profundidad, con límite líquido de 80,1%, plástico de 51,5% índice de plasticidad de 28,6% y COEL de 0,19, cerca del área de estudio.

➤ **Consolidación.** Se llama consolidación a la reducción gradual de volumen de una masa de suelo resultante de su aumento en el esfuerzo, comprensivo debido a cargas estáticas, tal reducción de volumen puede ser posible por la expulsión del aire que contiene el suelo, por la expulsión del agua del mismo o por el reajuste de su estructura interna. Las características de compresibilidad de un suelo que sufre el fenómeno de la consolidación son estudiadas en el laboratorio con el aparato llamado consolidámetro o edómetro (Bowles, 1.980). Se distinguen tres clases de consolidación (Cárdenas, 1.983):

- *Consolidación instantánea:* Se expulsan y comprimen los gases que llenan los vacíos del suelo.
- *Consolidación primaria:* Se aplica la carga y se reduce el volumen de una masa de suelo, debido a la expulsión del agua en los poros de aquella.
Consolidación secundaria: Reducción en volumen de una masa de suelo causada por la aplicación de una carga, debido al reajuste de la estructura interna de la masa de aquel, después de que la mayor parte de la carga ha sido transferida del agua intersticial al esqueleto sólido del suelo.

Por otro lado se llama arcilla preconsolidada aquella que alguna vez en su historia geológica ha soportado cargas mayores que las que recibe actualmente en el terreno, debido al peso de las tierras suprayacentes. La arcilla que nunca en su historia geológica ha soportado presiones mayores que las que recibe en la actualidad se denomina normalmente consolidada (Terzaghy y Peck, 1.973).

Las curvas que relacionan el esfuerzo, el asentamiento y el tiempo, sirven para obtener diversos coeficientes y módulos o índices, se destacan los que se anotan a continuación (Juárez y rico, 1.999):

- Coeficiente de compresibilidad: Se obtiene de la curva relación de vacíos (e) Vs presión (P), siendo la pendiente de la misma. La expresión matemática para el cálculo se muestra a continuación:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad \text{Donde } \Delta e = \text{Diferencial de relación de vacíos}$$

$$\Delta p = \text{Incremento de carga}$$

En la zona de estudio las expresiones en arcillas muestran un valor promedio de a_v de $7,3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr}$.

- Módulo edométrico. Se obtiene al dividir el coeficiente de compresibilidad, a_v , por la magnitud $1+e_0$, en donde e_0 es la relación de vacíos del suelo antes de sufrir el proceso de consolidación bajo un incremento de carga dada. Para materiales arcillosos plásticos dicho módulo está entre $25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Kg}$. y $200 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Kg}$. Informes de Álvarez y Hernández, 1.998, dan valores de $41 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Kg}$ para materiales en la zona.
- Coeficiente de consolidación. Para su cálculo es necesario tener la curva asentamiento-tiempo. Se obtiene a través de la expresión:

$$C_v = \frac{TH^2}{t} \quad \text{Donde: } T = 0,197$$

H = Es la mitad del espesor que tiene la muestra cuando ha llegado al 50% de consolidación, en cm.

t = Tiempo requerido para alcanzar el 50% de consolidación, en seg.

Para suelos arcillosos de alto límite líquido de la zona se reporta valores de C_v de $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$.

- Índice de compresión. Este parámetro sirve para estimar la magnitud de los asentamientos totales por consolidación. Se obtiene de la curva e-p (relación de vacíos Vs presión), con p en escala logarítmica. La fórmula para su cálculo es:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \left[\frac{p_{ot} \Delta p}{p_o} \right]}$$

Donde Δe = Diferencial de relación de vacíos
 p_o = Presión inicial del ensayo (Kg./cm²)
 Δp = Diferencial de presiones (Kg./cm²)

En la zona de estudio se han obtenido valores de C_c de 0,517, característico de arcilla con alta compresibilidad.

- Coeficiente de permeabilidad. La teoría de la consolidación permite calcular esta condición hidráulica de los suelos a través de la expresión:

$$K = C_v \times m_v \times \gamma_w$$

Donde: C_v = Coeficiente de consolidación, $\frac{cm^2}{seg}$
 m_v = Módulo edométrico, $\frac{cm^2}{seg}$
 γ_w = Densidad del agua, $\frac{cm^2}{seg}$

Álvarez y Hernández, 1.998, determinaron para minerales arcillosos presentes en el área de estudio valores del coeficiente de permeabilidad, K, de $11,4 \times 10^{-9}$ cm./seg.

- **Compactación.** En opinión de Crespo, 1.990, la compactación de los suelos, mediante equipos mecánicos es un medio para incrementar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos.

Montenegro y Malagón, 1.990, expresan que las características de compactación de los suelos se pueden obtener en el laboratorio a través de un ensayo tendiente a conocer las relaciones existentes entre humedad y densidad, la prueba se llama “Proctor”, nombre derivado de su autor. La prueba consiste en compactar muestras de suelo en un molde metálico de dimensiones específicas, haciendo variar el porcentaje de humedad y determinando al final el peso unitario seco y el porcentaje de humedad. Con estos datos se construye una gráfica en la que se puede estimar la máxima densidad y su correspondiente humedad óptima.

En la zona de estudio se han encontrado materiales arcillosos vermiculíticos, Álvarez y Hernández, 1.998, obtuvieron una densidad seca máxima de 1560 Kg./m³ para un contenido de humedad óptimo del 22,6%; valores típicos de las arcillas plásticas, confiriéndole características de compactibilidad que son de regulares a malas y solamente el equipo más conveniente para su densificación es el rodillo pata de cabra.

- **Relación de soporte de California (C.B.R.).** Según Bowles, 1.978, este parámetro es una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras. El ensayo C.B.R. mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte. El número C.B.R. (o simplemente C.B.R.) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en p.s.i) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra

compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga patrón unitaria requerida para obtener la misma profundidad de penetración de una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación esto es:

$$\text{C.B.R.} = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria Patrón}} \times 100$$

El mencionado autor sostiene la existencia de un método I para probar suelo grueso granulares, y otro método II de uso en suelos fino o de carácter expansivos. Indica que el valor de C.B.R. está entre 0-7 para suelo arcilloso de alto límite líquido (CH) de uso en subrasantes, siendo su clasificación de muy pobre a regular.

- **Resistencia al esfuerzo cortante.** Cárdenas, 1.983, indica que el suelo como cualquier otro material estructural está sometido a tres tipos de esfuerzos:
 - *De compresión.* Donde la resistencia del suelo a la falla por compresión pura es tan alta que no tiene importancia práctica.
 - *De tracción.* Los suelos soportan sólo pequeños esfuerzos y tiene incidencia en la formación de grietas en una estructura de tierra.
 - *De cortante o cizalladura.* Se convierte en aspecto básico en el estudio de las propiedades mecánicas. La resistencia al corte es punto de partida para el tratamiento en los problemas que tiene que ver con el suelo como material estructural.

El mencionado autor indica que la teoría de falla del suelo, es una teoría de esfuerzo cortante: la de Mohr-Coulomb.

La ecuación que rige es la siguiente:

$$S = C + \sigma \tan \phi$$

Donde:

S = Resistencia al corte del suelo

C = Resistencia por cohesión

$\sigma \tan \phi$ = Resistencia por fricción interna entre granos

σ = Esfuerzo normal a la dirección para la cual se considera la resistencia a la cizalladura.

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo

$\tan \phi$ = Coeficiente de fricción interna

La resistencia por cohesión (C) entre las arcillas depende de la carga de preconsolidación, composición mineralógica, estructura y contenido de humedad.

El ángulo de fricción interna tiende a estar inversamente ligado con el índice de plasticidad de las arcillas.

Bowles, 1.980, indica que el estudio de la resistencia al corte de los suelos tiene como fin básico encontrar los parámetros de resistencia al corte representados por la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ). También tienen como finalidad estudiar las relaciones esfuerzo – de formación. Al respecto se usan los ensayos triaxial, comprensión inconfiada y corte directo.

En la zona de estudio los investigadores Álvarez y Hernández, 1.998, caracterizaron un tipo de arcilla, encontrándose valores de ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión (C) de 9° y $0,18 \text{ Kg. /cm}^2$ respectivamente, para el caso de muestras remoldeadas; también un ángulo de 10° y una cohesión de $0,20 \text{ Kg. /cm}^2$ para muestras inalteradas tomadas a más de 1 metro de profundidad.

Por otro lado, Alviz et al, 1.988 y los investigadores últimamente mencionados efectuaron estudios sobre minerales arcillosos usando pruebas de resistencia a la compresión inconfiada, registraron valores de resistencia a la falla entre $0,74$ y $3,96 \text{ Kg./cm}^2$, cohesiones entre $0,37$ y $1,98 \text{ Kg./cm}^2$ en especímenes inalterados cuyos contenidos de humedad oscilaron entre 29% y 32.24% .

- **Resistencia a la compresión inconfiada.** Según Bowles, 1.980, cuando se introdujo por primera vez el método de ensayar muestras de suelo cohesivo recuperadas con tubos del campo en compresión simple, fue aceptado ampliamente como un medio para determinar rápidamente la resistencia al corte de un suelo utilizando la construcción del círculo de Mohor, es evidente que la resistencia al corte o cohesión (símbolo C) de una muestra de suelo puede ser calculada aproximadamente como:

$$c = \frac{qu}{2}$$

donde qu se utiliza siempre como el símbolo para representar la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.

El ensayo de compresión inconfiada se utiliza ampliamente porque constituye un método rápido de obtener aproximadamente la resistencia al corte de un

suelo cohesivo. De paso, debería destacarse que mientras los resultados del experimento de compresión inconfiada pueden tener poca confiabilidad, existen muy pocos métodos de ensayo que permitan resultados mucho mejores, a menos que se refinen considerablemente los procedimientos y esfuerzos del experimento (de los técnicos de laboratorio). Los resultados de resistencia al corte a partir de ensayos de compresión inconfiada son razonablemente confiables si se interpretan adecuadamente y se reconoce que el experimento tiene ciertas deficiencias. Por ejemplo, el uso de una curva de esfuerzo deformación unitaria basada en el experimento de compresión inconfiada para obtener un módulo de elasticidad (más correctamente un módulo de deformación unitaria, ya que el suelo no es un material elástico para las deformaciones unitarias asociadas usualmente con este tipo de experimentos) dará, en general un valor muy poco confiable.

- **Permeabilidad.** Según Peck et al, 2.000, un material es permeable cuando contiene huecos o intersticios continuos. Todos los suelos y todas las rocas satisfacen esta condición. El flujo del agua a través de las sustancias permeables está gobernado por la relación empírica:

$$V = Ki$$

Enunciada por primera vez por H. Darcy. En esta expresión, V es la velocidad de descarga, definida como la cantidad de agua que se filtra en la unidad de tiempo, a través del área unitaria de una sección transversal recta respecto a la dirección de la corriente; i es el gradiente hidráulico; y K es un coeficiente que se conoce con el nombre de coeficiente de permeabilidad. El valor de K, que tiene unidades de una velocidad, depende principalmente de las características de la sustancia permeable, pero también es función del peso volumétrico y de la viscosidad del líquido.

Según Libardi, 1.995, los métodos, para la determinación directa de la conductividad hidráulica, K , de los suelos pueden ser clasificados en métodos de laboratorio y métodos de campo. Los métodos de laboratorio pueden utilizar muestras con estructura deformada o muestras con estructura indeformada. En los métodos de campo, como su propio nombre lo dice, las medidas son ejecutadas en el propio campo y la perturbación del suelo es la mínima posible.

Juárez y Rico, 1.999, indican que los permeámetros y concretamente el de carga variable, pueden usarse sólo en suelos relativamente permeables, generalmente arenas y limos o mezclas de esos materiales, no plásticos. La permeabilidad de arcillas se determine en el laboratorio con la prueba de consolidación. La razón es que la baja permeabilidad de las arcillas daría lugar a un tiempo de prueba tan largo que la evaporación y los cambios de temperatura producirían errores de mucha consideración.

En opinión de Álvarez y Hernández, 1.998, arcillas muy plásticas vermiculíticas a el área de estudio, situadas entre 1,30 m y 1,80 m presentan valores de conductividad hidráulica de $9,38 \times 10^{-6}$ cm. /seg., usando la metodología del permeámetro de carga variable; según Terzaghy y Peck, 1.973, el grado de permeabilidad es muy bajo y corresponde a arcillas homogéneas impermeables.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la investigación se usaron:

3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Clasificados así:

3.1.1 Trabajo de Campo.

➤ **Equipos:**

- GPS
- Cámara fotográfica
- Barreno toma muestra indisturbada.
- Barreno holandés.
- Tubos Shelby.
- Pala y barretón.
- Cápsulas de humedad.
- Flexómetro de 3 metros.
- Cuchillos y destornilladores.
- Machetes

➤ **Materiales:**

- Bolsas plásticas
- Sacos de polipropileno
- Libreta de anotaciones
- Muestras de suelos inalteradas y disturbadas.

3.1.2 Trabajo de Laboratorio.

➤ **Equipos:**

- Máquina de compresión inconfiada

- Equipo de compactación (Proctor modificado)
- Edómetro
- Equipo de ruptura
- Equipo de C.B.R
- Equipo de difracción de rayos X
- Hidrómetro 152H
- Vibradora
- Equipo de corte de Casagrande
- Cazuela Casagrande
- Molino para triturar el suelo
- Balanza electrónica de precisión de 0.1 gr.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Equipo para secado al aire
- Permeámetro de cabeza variable
- Horno
- Bomba de vacío
- Cápsulas de humedad
- Juego de tamices de diferentes diámetros
- Mortero con mango
- Recipiente plástico para mezclar
- Agitadores manuales y mecánicos
- Mezcladora
- Reactivos requeridos para ensayos mecánicos

➤ **Vidriería:**

- Probetas de 100 ml

- Frasco volumétrico de 250 y 500 ml
- Beaker de 250 y 500 ml.
- Cilindros de sedimentación de 1000 ml.
- Matraces de 100 y 125 ml
- Erlenmeyer de 10 y 125 ml
- Pipetas
- Placa de vidrio
- Agitadores
- Otra vidriaría utilizada en los diferentes ensayos

3.2 MODELO METODOLÓGICO

Para cumplir con los objetivos propuestos la investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

3.2.1 Descripción de las áreas de estudio. Las zonas de estudio y sus suelos se encuentran localizadas en la periferia del casco urbano de las ciudades de Sincelejo y Corozal, distantes entre sí 12 Km.; en el noroccidente del departamento de Sucre. La primera localidad se encuentra a los 75° 27' de longitud oeste de Greenwich y 9° 20' de latitud norte tal como se observa en la figura 2.

Las áreas son zonas consideradas dentro del Plan de Ordenamiento Territorial de las dos ciudades (ver figuras 3 y 4): en la ciudad de Corozal se tiene un lote vecino a la actual urbanización "Villa Andrea", en la finca La Huerta, el perfil representativo se ubica topográficamente a 80 metros al sureste de la esquina sur del cementerio nuevo; y el otro en predios del antiguo colegio San Ignacio, al lado

Figura 2: Localización departamental de áreas de estudio

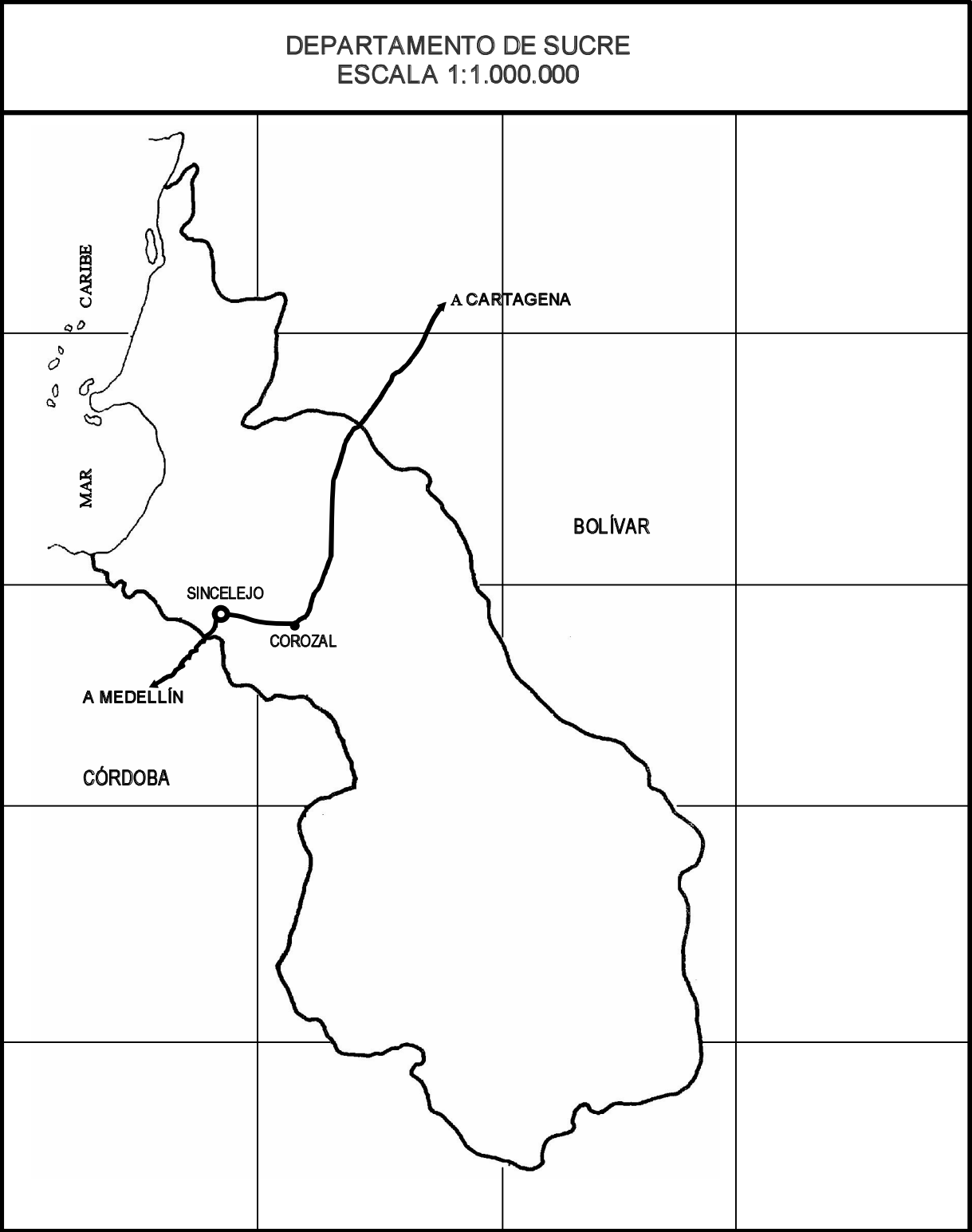


Figura 3: Localización municipal de áreas de estudio. Sincelejo

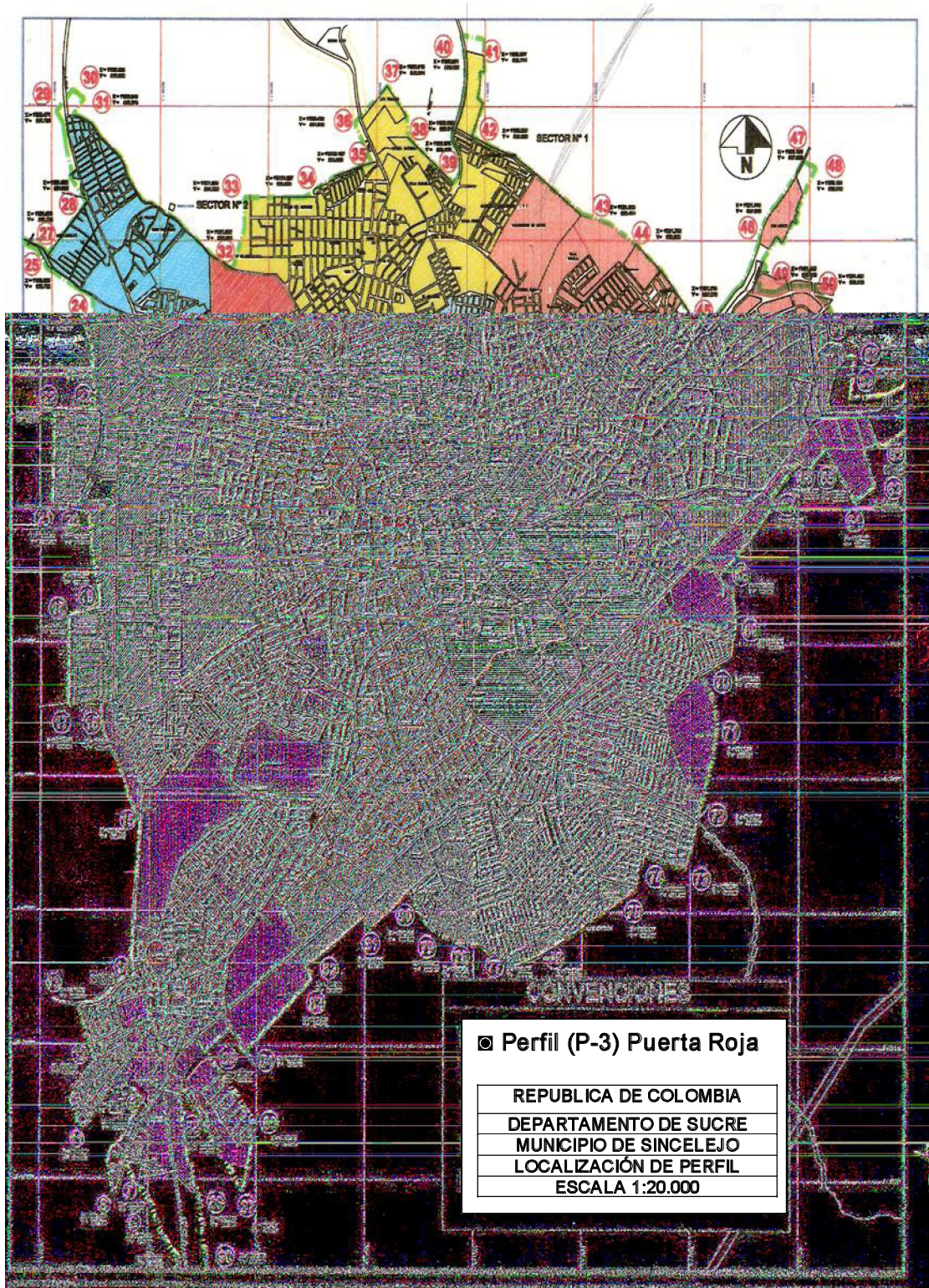
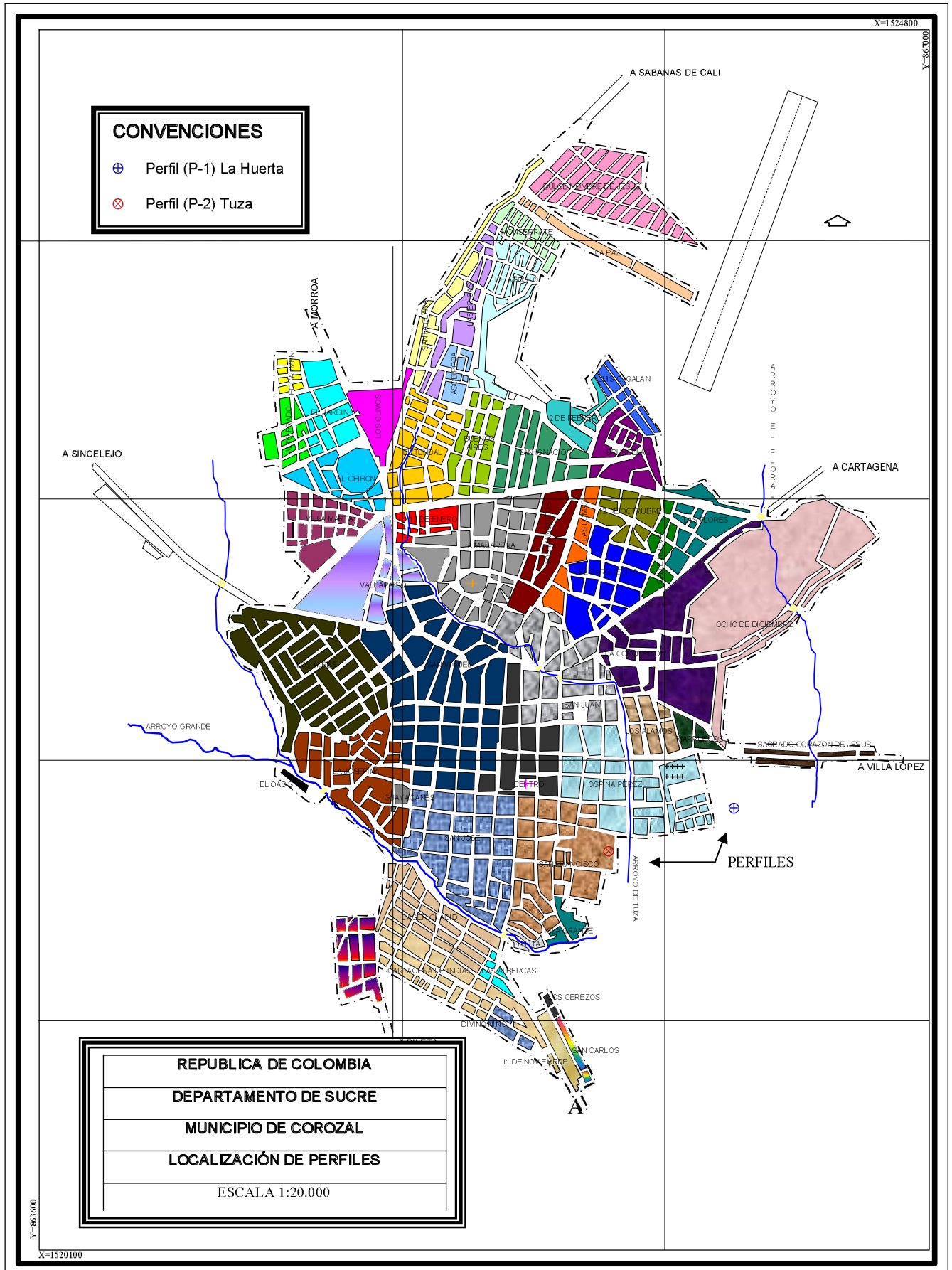


Figura 3. Casco urbano de Corozal (Sucre), con perfiles representativos



Fuente: Secretaría de Planeación Municipal. 2000

del futuro polideportivo del barrio San Francisco, el perfil se puede situar a 80 metros suroeste de las aulas del mencionado colegio. En la ciudad de Sincelejo se estudio un suelo perteneciente a la Ciudadela Puerta Roja de la Universidad de Sucre, localizado a 100 metros al noreste del bloque de aulas X. Las coordenadas planas estimadas con el equipo GPS indican que las calicatas o apiques representativos tienen la siguiente posición: (Tabla.1)

Tabla 1. Localización de perfiles representativos.

Nombre suelo	Perfil	Ciudad	Coordenadas Geográficas	
			N	W
La Huerta	P-1	Corozal	9° 18.694'	75° 14.247'
Tuza	P-2	Corozal	9° 18.671'	75° 17.266'
Puerta Roja	P-3	Sincelejo	9° 18.537'	75° 21.742'

Fisiográficamente los Montes de María son una geoforma constituida por suaves y colinas altas más o menos continuas en su encadenamiento. La subregión sabanas limita con la anterior, tiene pequeñas y numerosas colinas sin pliegues apreciables y con alturas que van de 30 a 100 metros sobre el nivel del mar.

3.2.2 Trabajo de campo. Se realizaron las siguientes fases:

Determinación y reconocimiento de las áreas de estudio. Para lo cual se consultaron los mapas de estudios de suelos previos realizados a nivel geotécnico. Con antelación, se efectuaron algunas visitas para verificar el comportamiento de los suelos y de los materiales arcillosos existentes ante la solicitud de obras civiles, especialmente viviendas.

Replanteo de tres (3) apiques en los sitios seleccionados más representativos.

Descripción detallada de los perfiles.

Realización de un programa de muestreo disturbado e indisturbado usando herramientas y equipo especial acorde con los ensayos de laboratorio. El muestreo se centralizó, mayoritariamente, en el horizonte o estrato subsuperficial asiento de la mayor actividad de los minerales arcillosos existentes.

3.2.3 Trabajo de laboratorio. Con las muestras tomadas en el campo se realizó un programa de análisis y ensayos, con muestras alteradas e inalteradas, según las exigencias metodológicas normativas. La mayoría de este trabajo se ejecutó sobre los materiales arcillosos situados en horizontes B. El método para identificar las arcillas se muestran en las tablas 2.

Tabla 2. Método de análisis mineralógico.

Tipo de Análisis	Método
Mineralogía de arcillas	Rayos X

La anterior actividad analítica se efectuó en el laboratorio de suelos del I.G.A.C., sobre muestras pertenecientes a horizontes subsuperficiales de mayor actividad del coloide mineral.

Las propiedades físicas determinadas aparecen con su metodología, norma y código respectivo en la tabla 3.

Los ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de física y mecánica de suelos de las Universidades de Sucre y Cartagena, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (I.G.A.C), y la empresa privada “Ingeniería e Investigaciones” en la ciudad de Sincelejo.

Tabla 3. Métodos, normas y códigos de las determinaciones físicas.

<i>Ensayo</i>	<i>Método</i>	<i>Norma y Código</i>
---------------	---------------	-----------------------

• Color	Munsell	
• Contenido de humedad natural	Gravimetrico	ASTM. D2216-71
• Granulometría fina (natural que pasa malla N° 200)	Hidrométrico	ASTM. D421-58
• Gravedad específica de los sólidos del suelo (Gs)	Frasco volumétrico	ASTM. D854-58
• Peso unitario de suelos cohesivos	Muestra de tubo	ASTM. D2937-71
• Porosidad	Indirecto	
• Límite líquido	Cazuela	ASTM 423-66
• Límite plástico	Rolado manual	ASTM. D424-59
• COEL	Densidades	
• Módulo de ruptura	Richards	
• Resistencia a la comprensión simple. (Muestra remoldeada)	Comprensión inconfinada	ASTM 2166-66
• Resistencia a la comprensión simple. (Muestra inalterada)	Comprensión inconfinada	ASTM 2166-66
• Resistencia al corte (Muestra inalterada)	Corte directo	ASTM. D3080-72
• Consolidación unidimensional	Edométrico	ASTM. D2435-70
• Relación humedad-densidad	Proctor modificado	ASTM. D1557-70
• Relación de soporte de California	Número C.B.R.	ASTM. D1883-73
• Permeabilidad	Cabeza variable. Indirecto ensayo de consolidación unidimensional	ASTM. D2434-68

3.2.3 Trabajo de oficina. El trabajo de oficina se efectuó según su requerimiento, antes, durante y después de las actividades de campo y laboratorio. Abarcó las siguientes actividades:

- Obtención de información de tipo geotécnico de las áreas de estudio, definiendo en mapas y fotografías asociadas la cartografía de los polígonos vérticos de interés. Seguidamente, con ayuda del reconocimiento de campo, se definió en el mapa los sitios representativos de los apiques.

- Se calcularon, interpretaron y analizaron los datos procedentes de los ensayos índices mecánicos e hidráulicos.
- Se determinaron, interpretaron y analizaron los parámetros físicos obtenidos indirectamente como:
 - Índice de plasticidad, índice de consistencia, índice de fluidez, índice de retracción, expansión potencial, actividad, tipo de mineralogía presente, etc. Todos obtenidos a través de los límites de Atterberg.
 - Sensibilidad de los minerales arcillosos. Conseguida con los resultados de la prueba de comprensión inconfiada en estado remoldeado e inalterado.
 - Coeficiente de conductividad hidráulica, que se calculó confiablemente a través de coeficientes C_v y m_v del ensayo de consolidación.
 - Se clasificaron geotécnicamente según la U.S.C. y A.A.S.H.T.O.
 - Se estimaron: el coeficiente de consolidación, grado de consolidación, tiempo de consolidación, asentamientos, índice de compresión, coeficiente de compresibilidad volumétrica, coeficiente de compresibilidad, de la prueba de consolidación unidimensional.
 - Relaciones esfuerzo-deformación obtenidas a través de los ensayos de corte y compresión.
 - Ángulo de fricción interna de los minerales arcillosos y su cohesión.
 - Peso seco máximo y CHO de compactación.
 - Además se determinó el C.B.R. de los suelos y parámetros asociados.
- Además se organizó toda la información reflejada en el informe final de la investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Siguiendo la metodología propuesta a continuación se presentan los resultados obtenidos, a los cuales se les realizó individualmente su correspondiente análisis.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE SUELOS

Corresponden respectivamente a los suelos situados en las localidades de Corozal (La Huerta y Tuza) y Sincelejo (Puerta Roja). Se destaca fácilmente el carácter netamente fino granular o pesado de los materiales generados a través de procesos geológicos de Intemperismo y sedimentogénesis.

En el apique P-1 (LA HUERTA), (Ver figura 5 y cuadro 1) se observó una secuencia de estratos así: uno que va hasta los 30 cm. de profundidad, denominado Ap, constituido por una arcilla negra de consistencia muy cohesiva y plástica a muy plástica; subyace entre los 30 y 57 cm. de profundidad una capa denominada B1, constituida por arcilla con color pardo amarillo oscuro, ligeramente pegajosa y muy plástica; entre los 57 y 85 cm. de profundidad se encuentra un estrato arcilloso denominado B2, con las siguientes características: color amarillo verdoso con moteados, ligeramente pegajosa y muy plástica; entre los 85 cm. y los 100 cm., cota hasta donde llegó la exploración, se encontró una capa C de material arcilloso de apariencia verde oliva con manchas y características de consistencia pegajosa y muy plástica.

Figura 5. Perfil del suelo La Huerta (Corozal)



Cuadro 1. Perfil estratigráfico. Suelo La Huerta (Corozal).

Profundidad (m)	U . S . C A.A.S.H.T.O	Perfil estratigráfico	Muestra	Descripción y Observación
0.0			Ap	Arcilla negra muy cohesiva y plástica a muy plástica
0.30			B1	Arcilla pardo amarilla oscura con pocas gravas, ligeramente pegajosa y muy plástica.
0.57	CH A-7-6 (20)		B2	Arcilla moteada amarillo verdosa ligeramente pegajosa y muy plástica.
0.85			C	Arcilla verde oliva con manchas, ligeramente pegajosa y muy plástica.
X				

Fin de la exploración

En la exploración P-2, denominada TUZA, (ver figura 6 y cuadro 2) se observó hasta los 31 cm. de profundidad una capa Ap de naturaleza arcillosa.

Figura 6. Perfil del suelo Tuza (Corozal)



Cuadro 2. Perfil estratigráfico. Suelo Tuza (Corozal).

Profundidad (m)	U . S . C A.A.S.H.T.O	Perfil estratigráfico	Muestra	Descripción y Observación
0.0			Ap	Arcilla pardo gris oscura pegajosa y muy plástica.
0.31	CH A-7-6 (20)		B	Arcilla negra clara o gris oscura pegajosa y muy plástica.
0.68			BC	Arcilla pardo gris oscura con moteados, muy adherente y muy plástica
0.83			C	Arcilla pardo oscura amarillenta , ligeramente pegajosa y plástica.
X				

Fin de la exploración

matiz pardo grisácea, pegajosa y muy plástica; sigue la secuencia hasta los 68 cm. de profundidad, un estrato B arcilloso de color negro claro, pegajoso y muy plástico, esta sección se muestreó para cumplir con los objetivos propuestos. Más abajo hasta los 83 cm. imperan materiales arcillosos, BC, pardo gris oscuro con manchas, pegajosos y plásticos; hasta 1 m. de profundidad llegó la exploración, encontrándose arcillas pardo oscuras amarillas, ligeramente pegajosas y plásticas.

El perfil estratigráfico P-3, denominado Puerta Roja, (ver figura 7 y cuadro 3), se exploró hasta 1 m. de profundidad, registrándose una secuencia de capas arcillosas Ap, B1, B2 y C. El primer estrato va hasta los 30 cm. de profundidad de color gris muy oscuro y en húmedo es pegajosa y muy plástica; de la anterior cota hasta los 51 cm. existen materiales que se escogieron para este estudio, de color negro, plásticos y pegajosos; subyace hasta los 81 cm. materiales finos gris oscuros, plásticos y muy pegajosos; en profundidad se encontraron otros materiales pardo oliva claros, plásticos y pegajosos.

4.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS PRESENTES EN LOS SUELOS.

Los resultados del análisis mineralógico de la fracción arcilla de los suelos, lo reportó el laboratorio según el anexo 1. Se desprende la dominancia de arcillas esmectíticas en los suelos estudiados, con porcentajes entre el 54% y 70 %; otros tipos de arcillas imperantes son la caolinita con porcentajes entre 8% y 10%, considerado como presentes; minerales del tipo de las micas, probablemente illita existe en más o menos un 5% en los suelos La Huerta, mientras que en los restantes suelos se presentan trazas (< 5% del mineral). Los análisis también reflejan la presencia de cuarzo coloidal en los suelos con valores dentro del rango entre 20 % y 30%. También se detectó la presencia de feldespatos con porcentajes menores del 5%, la existencia de arcillas del grupo de la

Figura 7. Perfil del suelo Puerta Roja (Sincelejo).



Cuadro 3. Perfil estratigráfico Suelo Puerta Roja (Sincelejo).

Profundidad (m)	U . S . C A.A.S.H.T.O	Perfil estratigráfico	Muestra	descripción y Observación
0.0			Ap	Arcilla gris, muy oscura, pegajosa y muy plástica.
0.30	CH A-7-6 (20)		B1	Arcilla negra plástica y pegajosa.
0.51			B2	Arcilla gris oscura, altamente plástica y cohesiva.
0.81			C	Arcilla pardo oliva clara, plástica y pegajosa.
X				

Fin de la exploración

esmética, a la cual pertenece la montmorillonita y la vermiculita entre otras, le otorga a los suelos una alta superficie específica que se refleja en las propiedades físicas como elevada retención de humedad, alta capacidad de expansión-contracción, deficiente flujo de agua en el suelo, macroporosidad reducida, deficiente aireación, mal drenaje, etc. (ver cuadro 4).

Investigaciones paralelas indican que la mineralogía de arenas de los suelos esta conformada en mas del 60 % por el mineral cuarzo y feldespatos en mas del 5 % en la fracción liviana; en la fracción densa del suelo esta formado por magnetita,ematita, homblenda, hiperstena, turmalina, granos alterados etc.

La mayoría de estos minerales tienden a formar por procesos de meteorización química, reacciones de oxidación e hidrólisis, los minerales arcillosos, teniendo en cuenta, además que el ambiente pedogenético existente es adecuado.

4.3 PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DE LOS SUELOS.

Propiedades fundamentales para un buen análisis de los resultados son el contenido de humedad gravimetrico (W), la relación de vacíos (e), el porcentaje de porosidad (η), los pesos unitarios seco y húmedo, y la gravedad específica (Gs).

Del anexo 2 se obtuvo la información pertinente que fue lograda gracias a la participación de diferentes laboratorios, como son: Universidad de Sucre, Universidad de Cartagena e I.G.A.C.

Cuadro 4. Constitución mineralógica de la fracción arcilla de los suelos.

Serie	Perfil	Horizonte	Prof. (cm.)	Posición geomorfológica	Minerales			
					Esméctita	Micas*	Caolinita	Cuarzo
La Huerta	P-1	B2	57-85	Colina parte alta	(≈54)	(≈5)	(≈9)	(≈30)
Tuza	P-2	B	31-68	Valle coluvio aluvial	(≈70)	<5%	(≈8)	(≈20)
Puerta Roja	P-3	B1	30-51	Valle coluvio aluvial	(≈67)	<5%	(≈10)	(≈21)
								Feldespatos
								<5%
								<5%
								<5%

* Mica probablemente de tipo illita

En la tabla 4 se presentan las propiedades gravimétricas de los materiales in situ. En las figuras 8, 9 y 10, se observan las variaciones del contenido de humedad con la profundidad del perfil.

Tabla 4. Contenido de humedad, pesos unitarios y gravedad específica de los sólidos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Profundidad (cm.)	Humedad gravimetría	Relación de vacíos (e)	Porosidad (%)	Peso unitario húmedo (γ _h) (gr./cm ³)	Peso unitario seco (γ _d) (gr./cm ³)	Gravedad específica de los sólidos
La Huerta (P-1)	Ap	0-30	35.47	0.72	41.86	1.74	1.36	2.55
	B1	31-57	30.08			1.93	1.46	
	B2	57-85	26.47			2.10	1.74	
	C	85-X	19.23			2.01	1.68	
Tuza (P-2)	Ap	0-31	51.49	0.69	44.13	1.81	1.25	2.59
	B	31-68	45.89			1.73	1.19	
	BC	68-83	30.57			1.90	1.42	
	C	83-X	27.66			2.06	1.64	
Puerta Roja (P-3)	Ap	0-30	40.96	0.75	42.85	1.80	1.41	2.24
	B1	30-51	30.92			1.60	1.20	
	B2	51-81	38.74			1.87	1.37	
	C	81-X	36.45			1.82	1.33	

4.3.1 Contenido de humedad. Los contenidos de humedad gravimétrica están dentro del rango entre 19.23% y 51.49%. Superficialmente los suelos que más contenido de humedad presentaron fueron Tuza y Puerta Roja, debido primordialmente a la posición geomorfológica en valle coluvio-aluvial plano, época invernal de descripción del perfil y presencia cercana del nivel freático. Los guarismos indican también la existencia de minerales arcillosos con mucha retención de agua.

La variación de la humedad gravimétrica con la profundidad fue decreciente en los suelos La Huerta y Tuza, debido más que todo al aporte realizado por las precipitaciones; sin embargo, en el suelo Puerta Roja el horizonte B1 el

comportamiento fue diferente debido a que el horizonte B1 mostró un contenido de humedad mas bajo, por el grado de estructuración desarrollado en el y el menor contenido de materia orgánica.

Figura 8. W (%) vs. profundidad. Suelo La Huerta.

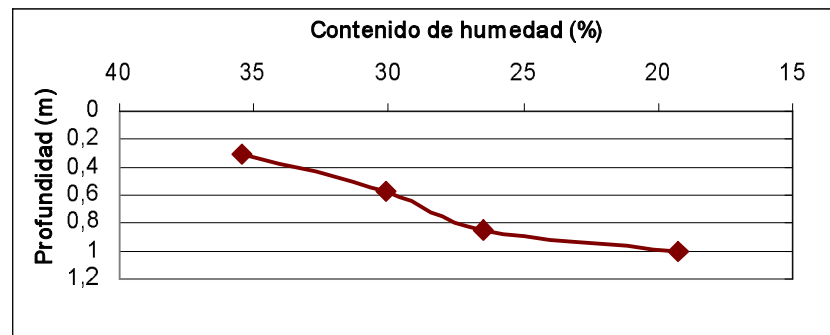


Figura 9. W (%) vs. profundidad. Suelo Tuza.

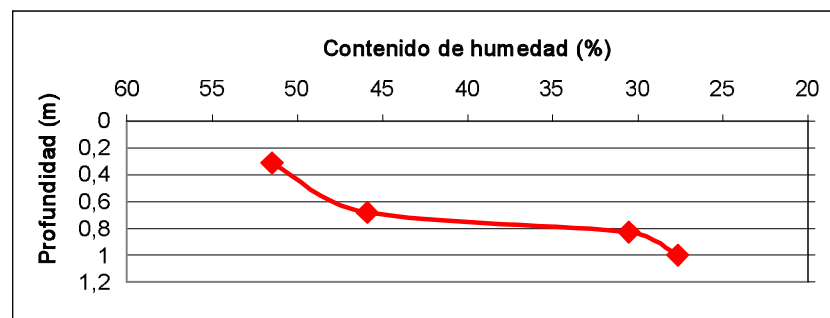
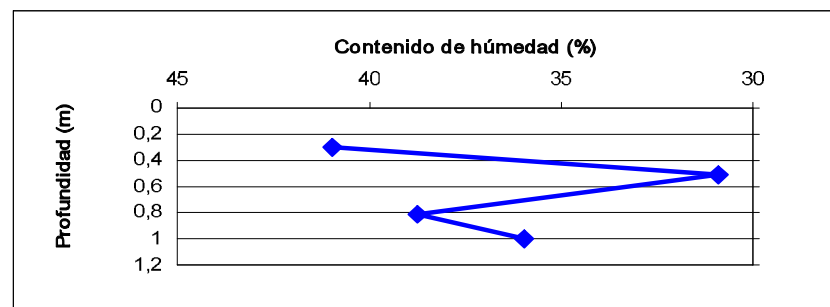


Figura 10. W (%) vs. profundidad. Suelo Puerta Roja

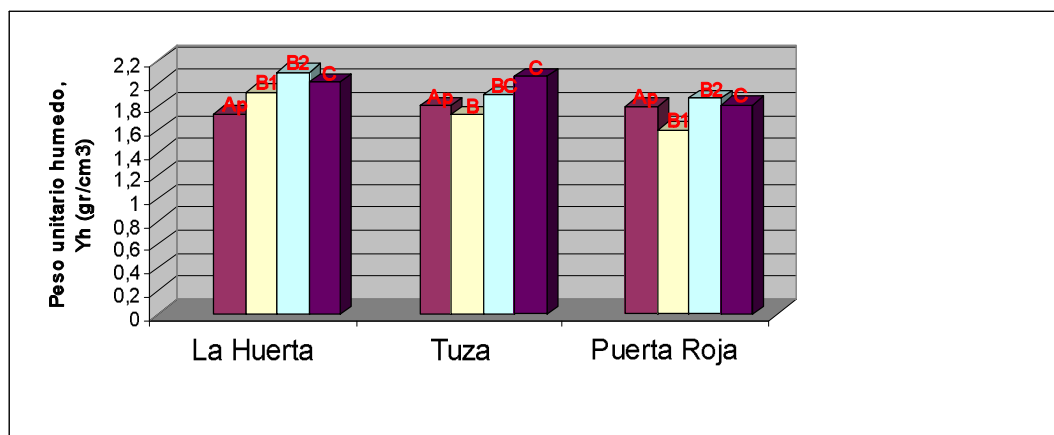


4.3.2 Relación de vacíos y porosidad. Estos parámetros fueron determinados a partir de los resultados de la prueba de consolidación, (ver anexo correspondiente), especialmente la relación de vacíos (e), la porosidad se calculó en función de la oquedad. El horizonte seleccionado de cada suelo presento valores de oquedad entre 0.72 y 0.79, y de porosidad entre 41.86 % y 44.13 %. Según Jiménez, 1954 citado por Márquez, 1983, los guarismos pertenecen a arcillas consistentes de tipo 2:1 como la montmorillonita.

4.3.3 Peso unitario. Se pueden analizar los resultados bajo dos enfoques tal como se muestra en las figuras 11 y 12.

- **Peso unitario húmedo.** Se registraron valores entre 1.6 gr./cm^3 y 2.1 gr./cm^3 . El mayor valor del rango se obtuvo en el horizonte C del suelo Tuza a más de 83 cm. de profundidad, este valor esta asociado con el grado de compactación presente debido al peso de las capas suprayacentes que consolidan al material arenoso fino arcilloso presente.

Figura 11. Variaciones del peso unitario húmedo (γ_h) de los suelos.



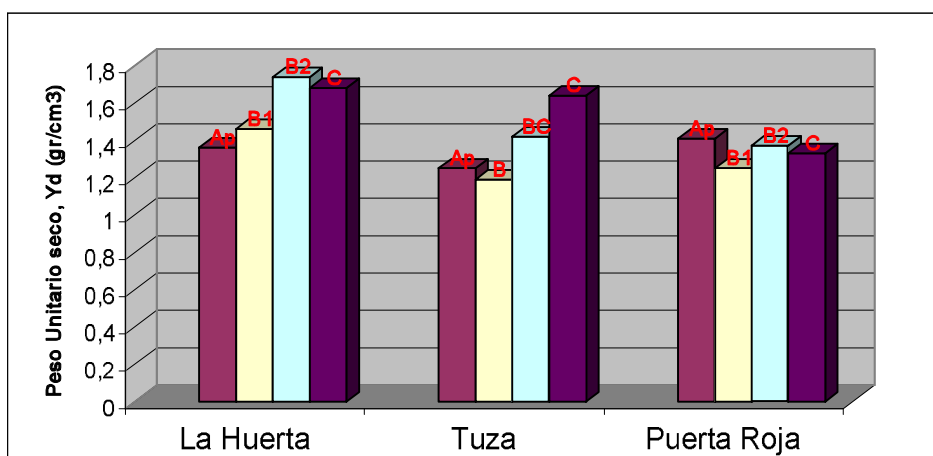
Las cifras tienen mucho que ver con el peso de los sólidos, pero más que todo con la mineralogía imperante en cada zona y su estructura cristalina que incide

en su capacidad de retención de humedad, a esto se puede también agregar los porcentajes de humedad de los materiales in situ.

En efecto los suelos presentan una estructura cristalina 2:1 expandible y contractable, en su estado húmedo tienen gran capacidad de adsorber grandes contenidos de humedad que incrementan notablemente su peso unitario húmedo.

- **Peso unitario seco.** Se presentaron valores en el rango de 1.19 gr./cm^3 , a 1.64 gr./cm^3 ; proporcionales a los contenidos de humedad presentes en los suelos y cada estrato. Las cantidades están en correspondencia directa con el peso de los sólidos y con su gravedad específica.

Figura 12. Variaciones del peso unitario seco (γ_d) de los suelos.



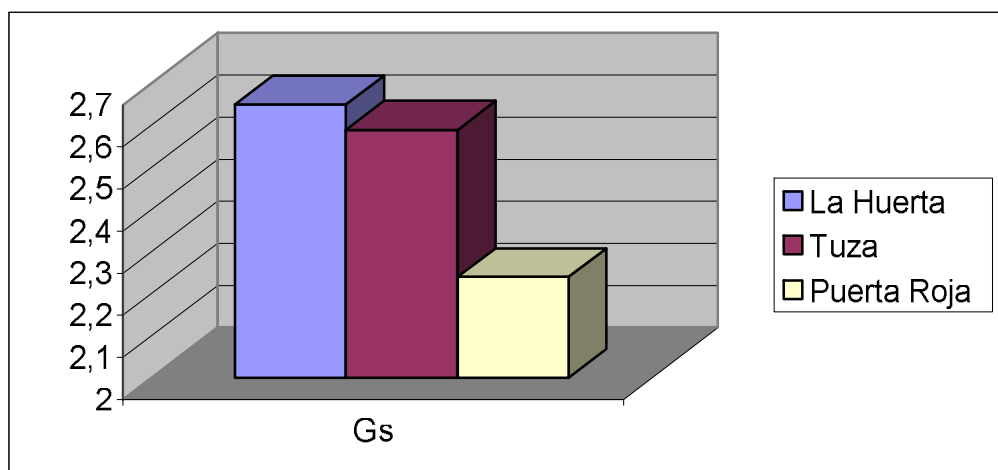
Según Lambe (1976), la montmorillonita presenta cifras de gravedad específica de 2.75 a 2.78. que están influyendo en la densidad seca. El peso unitario seco en los suelos La Huerta y Tuza tienen un comportamiento casi general de incrementarse con la profundidad, evento lógico si se tiene en cuenta que a mayor profundidad las capas soportan las cargas de los estratos de arriba. En los suelos Puerta Roja no se observó el mismo comportamiento

sino una tendencia errónea a disminuir, lo anterior debido al grado de estructuración mas desarrollado por la existencia de un complejo orgánico mineral que incrementa la porosidad.

- **Gravedad específica de los sólidos (Gs).** Las variaciones de este parámetro se observan en la figura 13; se encuentra en los materiales arcillosos con cifra de 2.55 (La Huerta), 2.59 (Tuza) y 2.24 (Puerta Roja). Valores del parámetro, de 2.65 fueron encontrados por Álvarez y Hernández (1998), en estudios efectuados en las mismas áreas de Sincelejo. Sin embargo, Lambe (1976) indica para la montmorillonita valores de 2.74 calculados a partir de su estructura cristalina. En este caso los valores de gravedad específica se encuentran más bajos debido a la presencia de carbonato de calcio especialmente en los suelos La Huerta y Puerta Roja.

Hay que destacar también el mensaje que lleva implícito el valor de la gravedad específica asociado con la presencia de minerales aluminosilicatados como la caolinita, illita, y montmorillonita, feldespatos y cuarzo.

Figura 13. Gravedad específica de los sólidos (Gs) del horizonte seleccionado en cada suelo.



4.4 ANALISIS GRANULOMETRICO

Los resultados de laboratorio, tanto de tamizado como de hidrómetro se muestran en el anexo 3; correspondientes a los horizontes o estratos de suelos seleccionados. Con base en lo anterior se elaboró el cuadro 5, y se graficaron las curvas granulométricas (ver figuras 14 ,15 y 16).

En términos generales los porcentajes de la fracción fina en los suelos son mayores que 93%, presentando un tope de 95.95% para el estrato Puerta Roja.

Cuadro 5. Resultados de algunos parámetros del análisis por tamizado y sedimentación de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Profundidad (cm.)	% fracción fina A.S.T.M (<0.074mm)	% Fracción <0.002 mm	% fracción arena A.S.T.M (0.074- 4.75mm)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	94.8	50.2	4.8
Tuza (P-2)	B	31-68	93.00	49.1	7.0
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	95.95	48.9	4.0

Si consideramos que los granos de limo varían entre 0.02 y 0.002 mm. y que el tamaño de la fracción arcilla es menor que 0.002 mm; entonces, en los suelos, entre el 21.7 % y el 29.8 %, por peso, corresponde a la fracción limo y en lo referente al coloide arcilloso, su presencia oscila entre el 53.7 % y el 56.9 %, o sea que los suelos presentan casi el mismo porcentaje por peso. El análisis granulométrico por tamizado indica que la fracción fina de los suelos (limos y arcillas) varia entre el 93 % y el 95.95 % estando la fracción arena, especialmente fina en el rango entre 4.05 % y 7 %, muy bajo en comparación con los contenidos de finos. El análisis de las curvas granulométricas indica que por su forma y extensión los suelos resultaron ser mal gradados.

Figura 14. Curva granulométrica. Suelo La Huerta (57- 85 cm.).

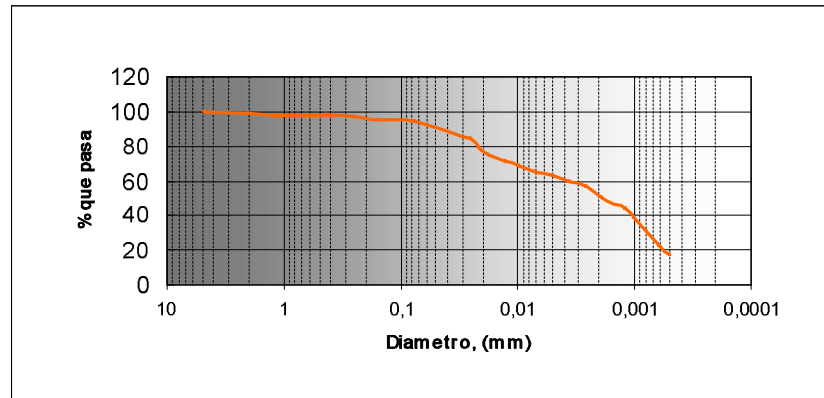


Figura 15. Curva granulométrica. Suelo Tuza (31- 68 cm.).

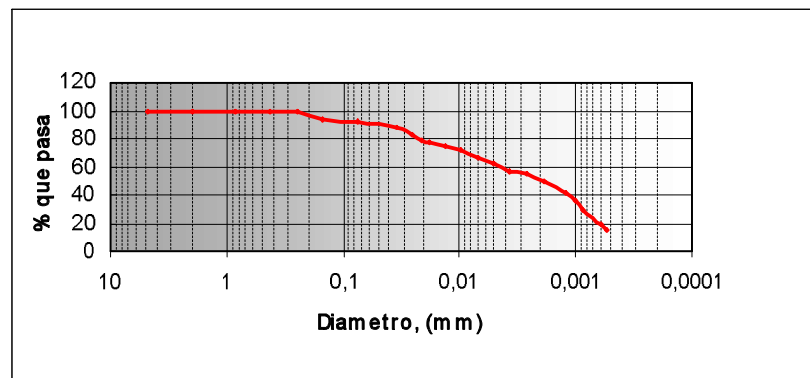
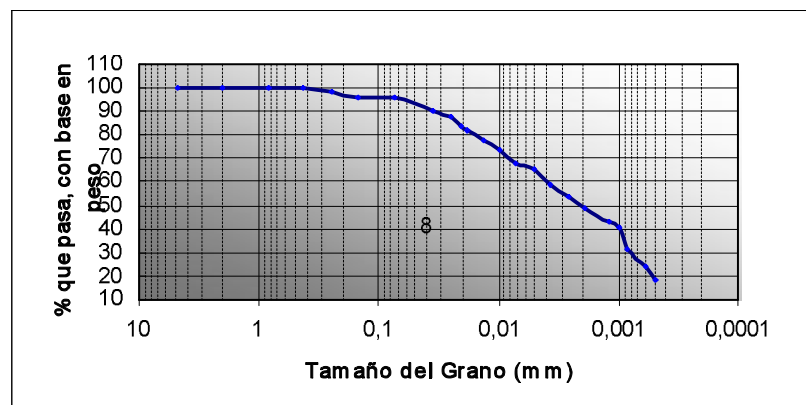


Figura 16. Curva granulométrica. Suelo Puerta Roja (30 - 51 cm.).



4.5 CONSISTENCIA

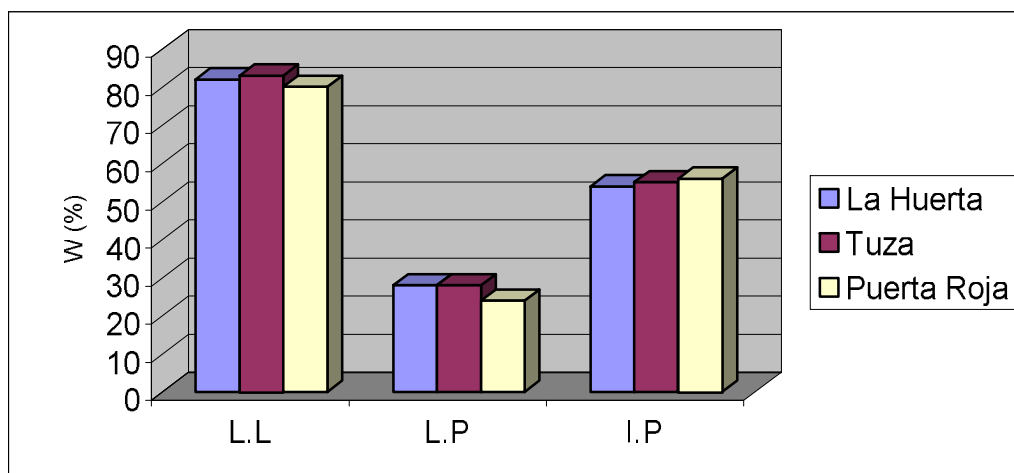
Los fundamentos para estudiar esta propiedad índice de los agregados del suelo son los denominados límites de Atterberg que se registran en el anexo 3. susodicho

En el cuadro 6 y figura 17 se observan los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad y sus variaciones en los tres suelos.

Cuadro 6. Límite líquido (L.L.), límite plástico (L.P.), índice de plasticidad (I.P.) de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Profundidad (cm.)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	82	28	54
Tuza (P-2)	B	31-68	83	28	55
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	80	24	56

Figura 17. Límite líquido (L.L.), límite plástico (L.P.), e índice de plasticidad (I.P.) de los suelos.



En términos generales, los tres parámetros de consistencia mencionados tienen guarismos, que según Cárdenas, 1983, corresponden a materiales arcillosos. El mismo autor cita a Atterberg quien sostiene que cuando los materiales tienen índices de plasticidad mayor que 17% son altamente plásticos y cohesivos como sucede con las arcillas 2:1 (esmectitas).

Por otro lado, también se puede reafirmar, con los resultados, lo encontrado por Álvarez y Hernández, 1998, cuando investigando suelos arcillosos en la ciudadela universitaria Puerta Roja, encontraron valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de 60.83 %, 30.72 % y 30.11% respectivamente.

El límite líquido de los suelos está entre el 80 % y 83 % y el límite plástico es de 24 % para los suelos Puerta Roja y 28 % para los suelos de Corozal. Cálculos del índice de plasticidad arrojaron valores entre 54 % y 56 %, muy similares, y en concordancia con el tipo de arcilla imperante en los tres suelos, que muestran una naturaleza mineralógica 2:1 que los habilita para retener buena humedad y por lo tanto mostrar características de consistencia dura en seco, friable en húmedo y, al menos, plástica y pegajosa en mojado.

El coeficiente de extensibilidad lineal (COEL) y el módulo de ruptura de los suelos se observan en el cuadro 7, utilizando los datos arrojados por el laboratorio en el anexo 3 antes mencionado y el anexo 4. En cuanto al primer parámetro se refiere los valores se consideran como muy altos con mas de 0.13, se exceptúa el horizonte C del suelo Tuza donde se estimó un valor del COEL de 0.06, interpretado como alto; esto indica, también la existencia de arcillas esmectíticas, como la montmorillonita; de alto grado de expansión y contracción. El módulo de ruptura se estimó para los horizontes preseleccionados, arrojando valores entre 0.021 bares (21000 dinas/cm²) y 0.829 bares (829000 dinas/cm²) los cuales son índices de fuerza y demuestran un gran grado de encostramiento del suelo que

no permite la emergencia de las plántulas, el grado de ruptura se convierte en un serio problema cuando en el suelo se tienen arcillas como las presentes.

Cuadro 7. Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) y módulo de ruptura de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Profundidad (cm.)	COLE	Módulo de ruptura	
				(Bar)	Dina/cm ²
La Huerta (P-1)	Ap	0-30	0.15	-	-
	B1	31-57	0.13	0.102	102000
	B2	57-85	0.14	-	-
Tuza (P-2)	Ap	0-31	0.14	-	-
	B	31-68	0.18	0.021	0.829
	BC	68-83	-	-	-
	C	83-X	0.06	-	-
Puerta Roja (P-3)	Ap	0-30	0.20	-	-
	B1	30-51	0.18	21000	829000
	B2	51-81	0.19	-	-

Por otro lado, utilizando los parámetros de Atterberg, la humedad natural del suelo al momento de la descripción del perfil, el porcentaje de partículas menor que 0.002 mm. de diámetro efectivo y las resistencias a la compresión simple inalterada y alterada, se pudo indicar otras características de los suelos asociadas con su actividad, compresibilidad, potencial de expansión, contracción lineal y resistencia a la compresión simple inconfiada, tal como se indican en el cuadro 8. La información se analizó así.

- **Actividad y tipo de arcilla presente.** Estimada como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas menores que 0.002 mm. éste parámetro varia entre 1.07 y 1.14, guarismos que según Bowles, 1978, están en el rango aproximado entre 0.3 y cerca de 5.5. Es decir que las actividades

Cuadro 8. Algunos parámetros y calificativos de los suelos derivados de los límites de Atterberg.

Suelo	I.P (%)	% partículas < 0.002mm	Contenido % de Humedad Natural (W_n)	Actividad De Arcilla (A)	Tipo de arcilla	Consistencia Relativa (Cr)	Índice de Fluidéz (If) (%)	Coefficiente de Compresibilidad (Cc)	Expansión Potencial	Contracción Lineal (%)
LA HUERTA	54	50.2	26.47	1.07	Esméctita	1.0	-2.8	0.65	Alto	>25%
TUZA	55	49.1	45.89	1.12	Esméctita	0.7	32.5	0.65	Alto	>25%
PUERTA ROJA	56	48.9	30.92	1.14	Esméctita	0.9	12.3	0.63	Alto	>25%

estimadas son normales y corresponden a arcillas entre la illita ($A = 0.9$) y la montmorillonita sódica ($A = 7.2$). El menor valor de actividad corresponde a la arcilla de La Huerta y el mayor pertenece a la esméctica de Puerta Roja, siendo el de la arcilla de Tuza muy similar al de esta última.

Al respecto, el mismo autor anteriormente citado también indica que una arcilla caolínica (1:1) tiene una actividad menor que una arcilla con alto contenido de montmorillonita y que a valores grandes de actividad corresponden valores mayores del potencial de cambio de volumen del suelo.

- **Consistencia relativa (Cr).** Calculada en función del límite líquido, contenido de humedad natural e índice de plasticidad. Al momento de su descripción en el apique, se puede indicar que las arcillas de La Huerta y Puerta Roja tienen un valor de la propiedad muy cercano a uno según lo cual tienen una resistencia a la compresión axial no confinada que debió variar entre 1.0 Kg./cm^2 y 5.0 Kg./cm^2 , por tener su consistencia relativa cerca a 1 (Crespo, 2000). Mientras que la arcilla de Tuza presentó una consistencia relativa mucho menor, lo que indica que en estado remoldeado el material tenía una resistencia a la compresión axial inconfiada menor.

- **Índice de fluidez (If).** Estimado a través de los valores de límite plástico, contenido de humedad natural e índice de plasticidad, se puede indicar que los suelos La Huerta, en estado, remoldeado se encontraban en estado semisólido con contenido de humedad natural menores que los correspondientes al estado plástico, porque el índice de fluidez es menor que cero; por lo tanto los suelos no pudieron ser amasados (Terzaghi y Peck, 1973). Mientras que las arcillas de Tuza y Puerta Roja presentaron, según el índice una consistencia en estado plástico, medio blanda y firme respectivamente. Según Crespo, 2000, si el índice está expresado en forma fraccional se puede decir que para valores cercanos a cero como los calculados para los suelos se presenta preconsolidación, es decir que estos han soportado presiones mayores a las dadas por los estratos en estado natural.

- **Coeficiente de compresibilidad (Cc), contracción lineal y potencial de expansión.** Todos los suelos presentaron un coeficiente de compresibilidad similar entre 0.63 y 0.65, calificado como altamente compresibles. En cuanto a la contracción lineal, estimada mediante el diagrama de la Texas Highways Testing, citado por Crespo, 2000, se presentaron porcentajes de contracción lineal mayores que el 25%; considerados como altos, en concordancia con lo expresado por el coeficiente de compresibilidad (Cc).

Así como se contraen, las arcillas investigadas sufren un proceso de hinchamiento que se manifiesta con un potencial de expansión alto. Este potencial de expansión se determinó en función del índice de plasticidad. El ensayo de compresión confinada que se mostrará más adelante indica también que los suelos sufren un proceso de expansión muy alto.

4.6 CLASIFICACIÓN U.S.C Y A.A.S.H.TO DE LOS SUELOS.

Siguiendo las normas, en el cuadro 9, se presentan las propiedades índices y la clasificación U.S.C y A.A.S.H.TO de los suelos.

Los suelos fino granulares, con más del 93 % pasando la malla N° 200 y de alto índice de plasticidad, fueron clasificados como CH, es decir, arcillas con alto limite líquido; dentro de la clasificación U.S.C se indica que tienen, según Lambe, 1976, impermeabilidad en estado compactado, deficiente resistencia al corte en estado compactado y saturado, elevada compresibilidad, deficiente facilidad de tratamiento en obras, etc.

Por su lado la AASHTO, los clasifica a todos dentro del grupo A-7-6, por presentar más del 36% de arcillas y limos, índices de plasticidad mayor que 11, limite liquido mayor o igual que 41% y limite plástico mayor que 30%; como presentan índices de grupo de 14 o más, tienen regulares a malos comportamientos como subrasantes.

Márquez,1983, indica que estos suelos presentan permeabilidad baja, regular a elevada capilaridad, mediana a elevada elasticidad, medianos a elevados cambios de volumen, el comportamiento del suelo compactado es de regular a bueno cuando seco y malo cuando está húmedo, regular a bueno como terreno de fundación, regular a pésimo para subbase, malo a pésimo para base y terraplenes.

Todo lo anterior esta indicando que estos suelos requieren de tratamientos químicos para su estabilización y mejora de sus propiedades in situ y como material de construcción.

Cuadro 9. Clasificación U.S.C y A.A.S.H.T.O de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Prof. (cm.)	Pasa Nº 200 (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. %	U.S.C.	A.A.S.H.T.O	Descripción definitiva
La Huerta (P-1)	B2	57-85	94.70	82	28	54	CH	A-7-6 (20)	Arcilla amarilla moteada, CH
Tuza (P-2)	B	31-68	93.00	83	28	55	CH	A-7-6 (20)	Arcilla negra parda, CH
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	95.95	80	24	56	CH	A-7-6 (20)	Arcilla negra, CH

Los suelos fino granulares, con más del 93 % pasando la malla N° 200 y de alto índice de plasticidad, fueron clasificados como CH, es decir, arcillas con alto límite líquido; dentro de la clasificación U.S.C se indica que tienen, según Lambe, 1998, impermeabilidad en estado compactado, deficiente resistencia al corte en estado compactado y saturado, elevada compresibilidad, deficiente facilidad de tratamiento en obras, etc.

Por su lado la AASHTO, los clasifica a todos dentro del grupo A-7-5, por presentar más del 36% de arcillas y limos, índices de plasticidad mayor que 11, límite líquido mayor o igual que 41% y límite plástico mayor que 30%; como presentan índices de grupo de 14 o más, tienen regulares a malos comportamientos como subrasantes.

Cárdenas, 1983, indica que estos suelos presentan permeabilidad baja, regular a elevada capilaridad, mediana a elevada elasticidad, medianos a elevados cambios de volumen, el comportamiento del suelo compactado es de regular a bueno cuando seco y malo cuando está húmedo, regular a bueno como terreno de fundación, regular a pésimo para sub-base, malo a pésimo para base y terraplenes.

Todo lo anterior está indicando que estos suelos requieren de tratamientos químicos para su estabilización y mejora de sus propiedades in situ y como material de construcción.

4.7 RELACIONES HUMEDAD – DENSIDAD (COMPACTACIÓN).

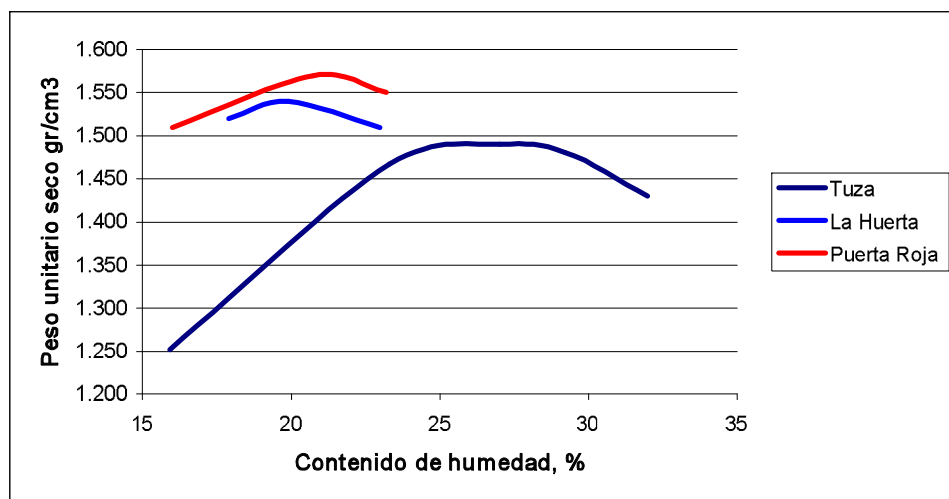
Ensayos de Proctor modificado realizados sobre las arcillas y cuyos resultados de laboratorio se muestran en el anexo 5, sirvieron para elaborar el cuadro 10.

Cuadro 10. Densidad seca máxima, γ_d , y contenido de humedad óptimo, C.H.O., de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Prof. (cm)	55 golpes			25 golpes		
			γ_d (gr./cm ³)	γ_d (KN/m ³)	C.H.O. (%)	γ_d (gr./cm ³)	γ_d (KN/m ³)	C.H.O. (%)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	1.66	16.3	19.6	1.54	15.1	19.9
Tuza (P-2)	B	31-68	1.56	15.3	23.0	1.49	14.6	27.0
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	1.71	16.8	19.8	1.57	15.4	20.75

La mejor forma de disponer mecánicamente los materiales, cuando se les aplica 25 golpes por capa, (ver figura 18) varia de una arcilla a otra, pero cada una dentro de los rangos de contenido de humedad optimo (C.H.O) entre 19.9 % y 27.0 %, y de peso unitario seco máximo entre 14.6 KN/m³ y 15.4 KN/m³.

Figura 18. Curvas de compactación de los suelos, a 25 golpes.

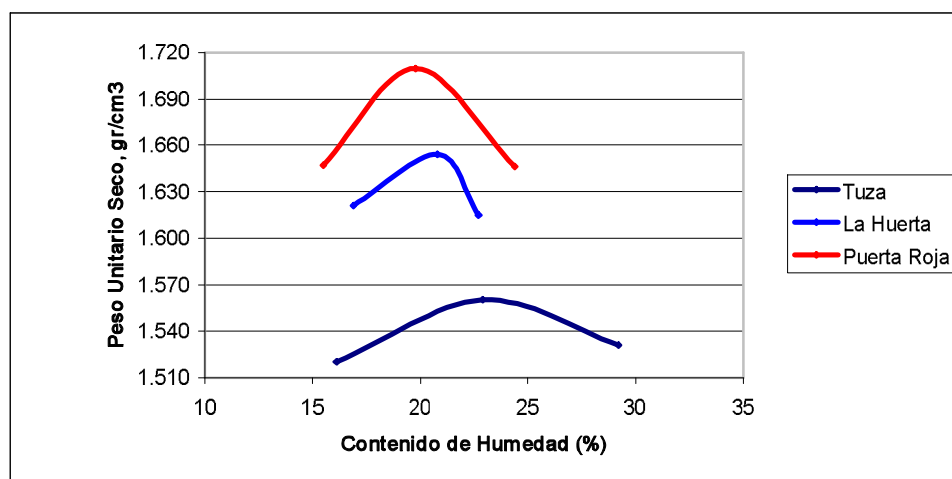


Una aplicación de 55 golpes por capa se realizó dentro del procedimiento para determinar el C.B.R. estimándose variaciones del contenido de humedad entre el 19.6 % y 23 %, para densidades secas entre 16.3 KN/m³ y 18.3 KN/m³. Al comparar los resultados anteriores se observó que cuando la energía de compactación se incrementa, entonces los materiales se compactan más, dejándose entrever un menor contenido de humedad óptima (C.H.O.). Es posible que el agua de adsorción presente en los minerales 2:1 influya en los menores porcentajes de humedad necesario para densificarlas. (Ver figura 19)

En forma generalizada, el contenido de agua del suelo durante el proceso de compactación es un factor fundamental en la densidad alcanzada. Para la energía suministrada por la metodología modificada, la densidad obtenida aumenta a

medida que se incrementa el contenido de agua del suelo, pero esta tendencia no es indefinida, sino que a partir de cierto contenido de humedad las densidades comienzan a decrecer, o sea, que existe un C.H.O. con el cual se alcanza la máxima densidad. La explicación de lo anterior estriba en considerar que a bajas humedades, en los suelos finos, la tensión capilar dificulta la compactación. Sin embargo, si se espera cierto límite de humedad, habrá un exceso de agua libre, la cual ocupará casi totalmente los vacíos del suelo impidiendo una buena compactación, por cuanto al recibir el esfuerzo se crearán fuerzas hidrostáticas que tratarán de separar las partículas del suelo.

Figura 19. Curvas de compactación de los suelos, a 55 golpes.



Según Lambe (1976), las formas de las curvas de compactación, se explica por la formación de la doble capa difusa y la orientación de las partículas. En el lado seco de las curvas (parte izquierda) al inicio, no hay agua suficiente para formar una capa doble, el suelo está floculado y las partículas están distribuidas al azar. Desde aquel punto hasta el pico de la curva, la capa doble se expande, las partículas de agua se hacen más gruesas para producir lubricación entre las partículas, las cuales se orientan de modo que se deslicen unas sobre otras y

formen una masa más densa. Desde el máximo de la curva hasta su punto más derecho (lado húmedo) prosigue el espesor de la partícula de agua sobre la concentración de las partículas por unidad de volumen, registrándose pesos volumétricos menores.

En las figuras 20 y 21 se pueden observar respectivamente las variaciones del C.H.O. y densidad seca máxima para 25 y 55 golpes/capa.

Figura 20. Contenido de humedad óptimo (C.H.O), a 55 y 25 golpes

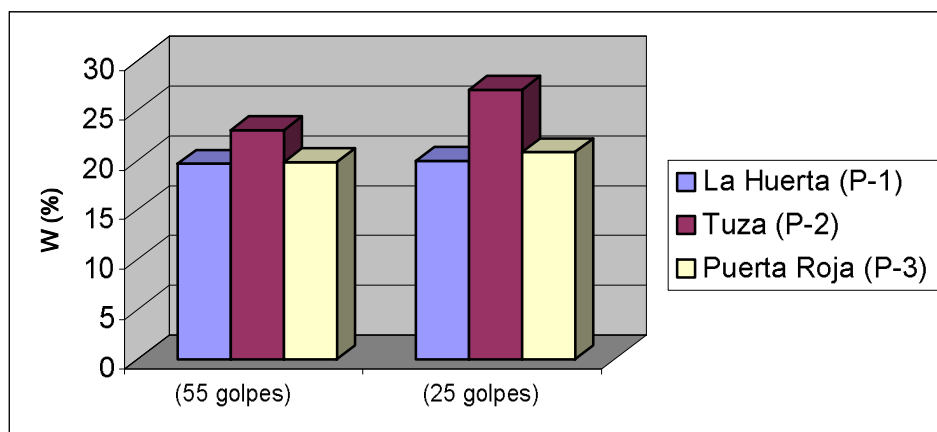
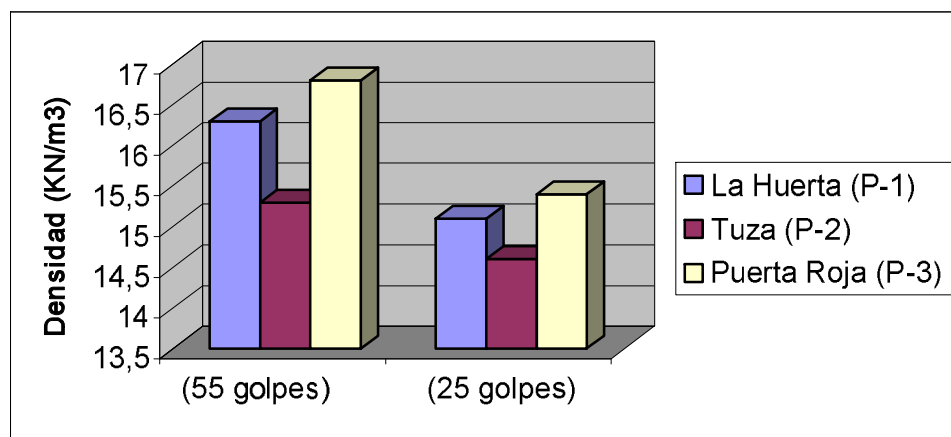


Figura 21. Densidad seca máxima, (KN/m³), a 55 y 25 golpes



Los valores de γ_{dmax} y C.H.O obtenidos para los distintos materiales están muy cerca de los arrojados por ensayos de arcillas 2:1, vermiculíticas, de 1.56 % y 22.69 % respectivamente, en trabajos realizados por Álvarez y Hernández (1998).

Se observa en los citados anexos que la curva de compactación va acompañada por la curva de cero aire (saturación total de agua) dibujada con base en la gravedad específica de los sólidos de cada una de las arcillas. La no intersección de dichas curvas significa que los suelos parcialmente saturados al inicio del proceso de densificación, no alcanzaron la saturación por esta acción. La forma y separación de las curvas, reflejan el grado de precisión obtenido durante el ensayo.

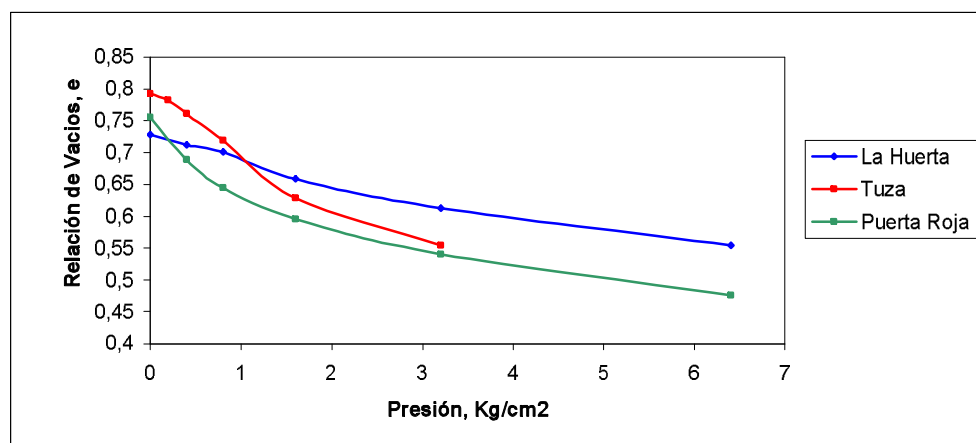
Según Fernández, 1982, si se compacta un suelo arcilloso con humedades muy bajas ó prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la energía de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

4.8 CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS.

En el anexo 6 se observan los resultados de laboratorio en donde cada uno de los especímenes se cargaron por incrementos y se tomaron para cada uno de estos lecturas de deformación y tiempo. Se aclara que durante los ensayos no hubo descarga, por lo que las curvas correspondientes no aparecen. De acuerdo con los resultados mencionados se presentan a continuación los principales aspectos de la deformación compresiva por consolidación.

4.8.1 Curvas que relacionan la oquedad con los esfuerzos. En la figura 22. aparecen las curvas representativas de los suelos , que confrontan la relación de vacíos y los esfuerzos aplicados, en escala aritmética; al examinar dichas curvas se puede observar que las relación entre las variables dista bastante de ser lineal, como sí lo es en el caso de las deformaciones elásticas de un material que sigue la ley de Hooke, por lo que la variación en la pendiente de las curvas son el índice de una compresibilidad que cambia con el tiempo; para los tres suelos estudiados la compresibilidad es mayor en los primeros estadios del ensayo cuando las cargas aplicadas no exceden los 2 Kg/cm² y se observó que para el anterior intervalo de carga el suelo Tuza tiene la mayor rata de deformación seguido por el suelo Puerta Roja; la parte final de las curvas tienden a presentar pendientes constantes, denotándose, entonces la persistente deformabilidad de los suelos con la aplicación de la carga.

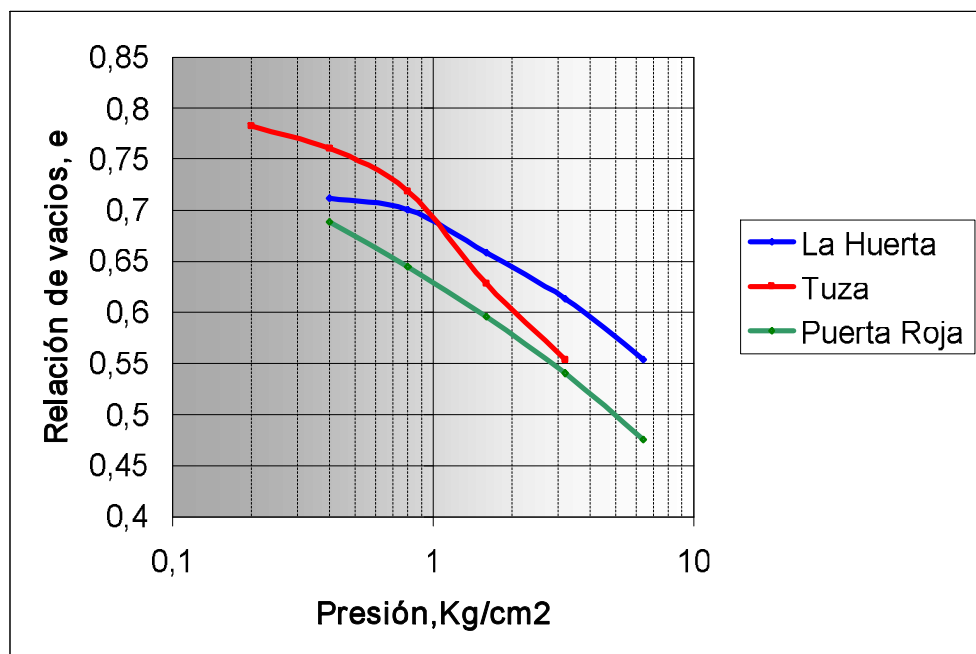
Figura 22. Curvas relación de vacíos vs. presión.



Por otro lado, la relación semilogarítmica entre los esfuerzos compresivos y la oquedad (figura 23), muestra curvas en las que existe inicialmente un tramo de recompresión que está comprendido en el rango entre 0.2 Kg./cm² y 1 Kg./cm² caracterizado por tener menos inclinación, infiriéndose que la arcilla fue sometida

a esfuerzos menores que los ya sufridos en épocas pasadas ,y que después de este tramo la curvatura va en aumento hasta un máximo presentado en la cercanía del comienzo de una segunda parte aproximadamente recta y en la cual la pendiente es muy grande (tramo virgen) , para cargas entre 1 Kg./cm² y 6.4 Kg./cm², que exceden la mayor presión efectiva soportada por el suelo en toda su historia geológica. También se observa que el suelo Tuza tiene mayor rata de deformación que los restantes suelos debido a su constitución granulométrica que incluye arenas especialmente finas generadoras de una mayor oquedad; los suelos La Huerta y Puerta Roja tienen casi el mismo comportamiento compresivo ante las cargas aplicadas.

Figura 23. Curvas semilogarítmicas de relación de vacíos vs. Presión.



4.8.2 Presión de preconsolidación. En el anexo mencionado también se observa la deducción de la preconsolidación, calculada según el criterio de Casagrande, citado por Márquez, 1983; resumiendo los resultados se elaboró la tabla 5 que

reseña el rango de variación de dicha presión entre 3.5 y 4.4 Kg./cm² correspondiente a los suelos La Huerta y Puerta Roja respectivamente.

Tabla 5. Carga de preconsolidación de los suelos

Suelo Perfil)	Presión de preconsolidación (Kg./cm ²)
	3.7
La Huerta (P-1)	
Tuza (P-2)	3.5
Puerta Roja (P-3)	4.4

Considerando la presión total , efectiva, que soportan los materiales en estado natural hasta la cota de localización en el perfil , debido al peso de los materiales suprayacentes, que está en el rango entre 0.12 Kg./cm² y 0.16 Kg./cm², se observa que es mucho menor que la presión de preconsolidación de los distintos suelos, significando que las arcillas son preconsolidadas, en consonancia con lo afirmado en el estudio de la consistencia de las arcillas a través de su índice de fluidez y aspecto ventajoso en cierto sentido ya que ello se manifiesta en que son mas duras y resistentes. La principal causa de la preconsolidación de los materiales estudiados es, por supuesto, el haber tenido encima de ellos en épocas anteriores grandes pesos de tierra que mas tarde fueron erosionados y transportados a otros sitios; en términos geológicos éstos materiales se consideran arcillositas formadas a través de procesos de litificación que involucran fenómenos de compresión y desecación con algo de cementación.

4.8.3 Curvas de consolidación-tiempo. Las confrontaciones de los parámetros asentamiento-tiempo aparecen en el citado anexo 6, para sendas cargas que, en la mayoría de los casos, fueron de 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 y 6.4 Kg./cm². La forma

de las curvas indica que en la medida en que el ensayo transcurre, la lectura del extensómetro, inicialmente mayor, disminuye, incrementándose el porcentaje de consolidación.

Utilizando los procedimientos gráficos expuestos por Casagrande y Fadum citados por Peck et al, 2000, el grafico sirvió para determinar el 0 % y el 100 % de la consolidación primaria; para posteriormente estimar el 50 % de consolidación y el t_{50} correspondiente. Por debajo de la línea horizontal, paralela al eje del tiempo que corresponde al 100 % se observa el segmento de la curva perteneciente a la consolidación secundaria.

En los cuadros 11, 12 y 13. se observan los grados de consolidación y el t_{50} del horizonte seleccionado de cada suelos, la información se sustrajo de las curvas asentamiento-tiempo dibujadas para cada incremento de cargas. Para todos los suelos se observa que los diferentes grados de consolidación generalmente aumentan con el incremento de las cargas siendo, obviamente estos parámetros mayores para el último incremento de carga, esto indica la influencia de estas en el proceso compresivo. En los citados cuadros se ve que cuando se aplica la primera presión, el grado de consolidación obtenido no es cero, debido a la ocurrencia de la consolidación instantánea o inicial, consistente en una reducción rapidísima del volumen del suelo debido a la compresión y posterior expulsión del aire que llena los vacíos del suelo, fenómeno que precede a la consolidación primaria.

También en los citados cuadros se analizan las variaciones de los grados de consolidación para los porcentajes de deformación compresiva incrementándose aquellos en la medida en que los porcentajes de consolidación también aumentan.

Cuadro 11. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo La Huerta.

p (Kg./cm ²)	U = 0%		U = 50%		U = 100%		t_{50} min.
	pul.	cm.	pul.	cm.	pul.	cm.	
0.4	0.00026	0.00066	0.00063	0.00160	0.00094	0.00238	3.5
0.8	0.01182	0.03000	0.01383	0.03513	0.01588	0.04033	6.0
1.6	0.03060	0.07770	0.03490	0.08865	0.03937	0.09999	3.2
3.2	0.05492	0.13000	0.05914	0.15022	0.06622	0.16918	7.0
6.4	0.08592	0.21823	0.09293	0.23604	0.10000	0.25400	18.0

Cuadro 12. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo Tuza.

p (Kg./cm ²)	U = 0%		U = 50%		U = 100%		t_{50} min.
	pul.	cm.	pul.	cm.	pul.	cm.	
0.2	0.00000	0.00000	0.00253	0.00642	0.00524	0.01331	9.0
0.4	0.01100	0.02794	0.01400	0.03556	0.01687	0.04285	5.4
0.8	0.02889	0.07338	0.03445	0.08750	0.03978	0.10104	9.8
1.6	0.06800	0.17272	0.07916	0.20110	0.08980	0.22809	14.0
3.2	0.11100	0.28194	0.12112	0.30764	0.13120	0.33324	19.0

Cuadro 13. Grados de consolidación y t_{50} . Suelo Puerta Roja.

p (Kg./cm ²)	U = 0%		U = 50%		U = 100%		t_{50} min.
	pul.	cm.	pul.	cm.	pul.	cm.	
0.4	0.01900	0.04830	0.02900	0.07370	0.03700	0.09398	18
0.8	0.04220	0.11719	0.05200	0.13208	0.05980	0.15189	16
1.6	0.06637	0.16858	0.07930	0.20145	0.09025	0.22923	18
3.2	0.09710	0.24663	0.10995	0.27826	0.11985	0.30442	19
6.4	0.12714	0.32294	0.14263	0.36228	0.15845	0.40246	18

El tiempo en que ocurre el 50 % de la consolidación varía de un suelo a otro, pero siempre dentro del rango entre 3.2 min. y 19 min; siempre, en cada suelo con una tendencia a aumentar con el esfuerzo aplicado, sin embargo se observan excepciones de los valores de t_{50} debido al proceso de hinchazón e imbibición de

la arcilla y de la velocidad de salida del agua de los poros, aunque no se descartan errores cometidos durante los ensayos. También se estimó el tiempo correspondiente al 90 % de consolidación que oscilo entre 14 min. y 190 min. para los tres suelos, se ve la proporcionalidad directa de este tiempo con el incremento de las cargas.

4.8.4 Asentamiento (S), coeficiente de compresibilidad (a_v) y módulo edométrico (m_v) de los suelos. En los cuadros 14, 15, y 16, se sintetizan para cada intervalo de carga aplicada, los mencionados parámetros que representan una medida, en una u otra forma, de la compresibilidad de los suelos.

- **Asentamientos(S).** Calculados en función de la altura inicial de las muestras y expresados en términos de la altura de vacíos se encontraron variaciones finales dentro del rango entre 0.25 cm. y 0.40 cm. correspondientes a los suelos La Huerta y Puerta Roja respectivamente ; durante el ensayo los asentamientos se incrementaron , como se esperaba ,con el aumento de los esfuerzos y se analiza el cambio de volumen experimentado por las muestras debido totalmente a la reducción de los poros, ya que los sólidos son para este caso prácticamente incompresibles; es decir que los asentamientos producidos en cada suelo van a depender de sus características de compresibilidad intrínsecas; como se analizará inmediatamente.
- **Coeficiente de compresibilidad (a_v).** Determinado analíticamente como la pendiente absoluta de la curva oquedad–carga ,dibujada en escala aritmética, ya que aquella es negativa, presentó valores para los distintos incrementos de carga experimentados entre $6.18 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ y $1.04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ muy similares a los encontrados por Álvarez y Hernández, 1998, en suelos de Puerta Roja muy cercanos. Los resultados indican que el coeficiente tiene una tendencia a

disminuir con el aumento de las cargas, razón explicable con la conducta de disminución de la relación de vacíos en la medida en que el ensayo transcurre.

- **Módulo edométrico (m_v).** Este índice de la naturaleza compresible de los suelos finos presentó valores promedios de $4.86 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ para el suelo Tuza, $1.72 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ para el suelo La Huerta y $4.64 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ para el suelo Puerta Roja, guarismos que están dentro del rango establecido por Jumikis, 1965, citado por Márquez, 1983, para arcillas plásticas. Como referencia se cita a Álvarez y Hernández, 1988, quienes encontraron guarismos muy similares en el área de la ciudad de Sincelejo. Los resultados obtenidos permiten inferir que el módulo presenta una tendencia a aumentar, por el proceso de hinchazón que ocurre en este tipo de materiales arcillosos.

El modulo m_v es análogo con el inverso del modulo de elasticidad estimado a través de la ley de Hooke, dado que el primero es una medida directa de la compresibilidad del suelo en tanto que el segundo es una medida directa de la rigidez de un material elástico, o sea una medida inversa de su deformabilidad. Ello porque en el diagrama de esfuerzo-deformación del cual se obtiene el modulo de elasticidad, el esfuerzo esta en las ordenas mientras que en el diagrama de consolidación el esfuerzo se encuentra en la abscisas.

4.8.5 Tiempo y coeficiente de consolidación para 50% y 90% de consolidación. En los cuadros 17, 18 y 19 se resumen todos los parámetros que tienen que ver con la velocidad del proceso de consolidación de los suelos. Existen varias relaciones simples reveladas de los resultados del ensayo de consolidación; para una arcilla dada, el tiempo necesario para alcanzar un tiempo de consolidación dado aumenta en proporción al cuadrado del espesor de la capa,

Cuadro 17. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (Cv) para el 50% 90% de consolidación. Suelo La Huerta.

p (Kg./cm ²)	Altura Sólido (cm)	Altura muestra (cm)	e	T ₅₀ (min)	T ₉₀ (min)	C _{v50} (cm/s ²)	C _{v90} (cm/s ²)
0.0	1.4695	2.54	0.7285				
0.4	1.4695	2.5156	0.7119	3.5	14	0.00591	0.00639
0.8	1.4695	2.4985	0.7003	6.0	59	0.00340	0.00150
1.6	1.4695	2.4366	0.6582	3.2	41	0.00606	0.00205
3.2	1.4695	2.3706	0.6132	7.0	72	0.00262	0.00110
6.4	1.4695	2.2837	0.5541	18.0	140	0.00095	0.00053

Cuadro 18. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (Cv) para el 50% y 90% de consolidación. Suelo Tuza.

p (Kg./cm ²)	Altura Sólido (cm)	Altura muestra (cm)	e	T ₅₀ (min)	T ₉₀ (min)	C _{v50} (cm/s ²)	C _{v90} (cm/s ²)
0.0	1.417	2.54	0.7925				
0.2	1.417	2.5253	0.7821	9.0	73.0	0.00231	0.00123
0.4	1.417	2.4946	0.7605	5.4	37.0	0.00376	0.00238
0.8	1.417	2.4357	0.7189	9.8	101	0.00198	0.00083
1.6	1.417	2.3071	0.6282	14	190	0.00124	0.00040
3.2	1.417	2.2022	0.5541	19	120	0.00083	0.00057

Cuadro 19. Relación de vacíos (e), tiempo (t) y coeficiente de consolidación (Cv) para el 50% y 90% de consolidación, suelo Puerta Roja.

p (Kg./cm ²)	Altura Sólido (cm)	Altura muestra (cm)	e	T ₅₀ (min)	T ₉₀ (min)	C _{v50} (cm/s ²)	C _{v90} (cm/s ²)
0.0	1.447	2.54	0.7553				
0.4	1.447	2.4432	0.6885	18	27	0.00108	0.00312
0.8	1.447	2.3802	0.6449	16	95	0.00116	0.00084
1.6	1.447	2.3086	0.5954	18	115	0.00097	0.00066
3.2	1.447	2.2289	0.5403	19	85	0.00085	0.00083
6.4	1.447	2.1349	0.4754	18	97	0.00083	0.00066

y para capa de igual espesor dicho tiempo aumenta en proporción lineal con el valor de la relación modulo edometrico: coeficiente de permeabilidad, con la

disminución de la relación de vacíos tanto la permeabilidad como el módulo edométrico disminuyen rápidamente pero la relación k/m_v es bastante constante dentro de un intervalo grande de presiones. Los resultados indican que el coeficiente de consolidación, que indica la rata de consolidación del terreno con el tiempo tiende a disminuir con el incremento de las cargas; los valores promedios de C_v variaron entre $9.78 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $2.024 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ correspondiente respectivamente a los suelos Tuza y Puerta roja; en los primeros por presentar menor coeficiente de permeabilidad (k) y en los segundos debido al menor modulo edométrico.

Paralelamente los resultados de laboratorio arrojaron resultados sobre el tiempo y el C_v del grado de consolidación del 90 %. El tiempo varió entre 37 min. y 140 min. para todos los ensayos, insinuando un incremento de su valor con la aplicación de las cargas; la rata de consolidación con el tiempo (C_{v90}) en términos generales fue menor que el coeficiente de consolidación calculado para el 50 % de esta debido a que en las ultimas instancias temporales la velocidad de salida del agua de los poros del suelo es menor.

Para los suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) estudiados cuyo índice de plasticidad esta a los alrededores del 50 %, se obtuvieron valores máximos del coeficiente de consolidación (C_{v50}) de $1.08 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ el cual se encuentra muy cerca de $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ reseñado por Feferbaumz, 1992 para arcillas y en el tramo de compresión virgen.

Con relación al coeficiente de conductividad hidráulica, en los cuadros 20, 21 y 22, se dan los valores calculados para cada incremento de carga, en función de C_{v50} , m_v y la densidad del agua; estos resultados se analizarán en la sección correspondiente a las propiedades hidráulicas de los suelos.

Cuadro 20. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo La Huerta.

p (Kg./cm ²)	Asentamiento		t ₅₀ (min)	C _y (cm ² /s)	m _v (cm ² /gr)	K (cm/s.)
	Pulg.	cm.				
0.4	0.00366	0.0930	3.5	0.00591	9.970 x10 ⁻⁶	5.89 x10 ⁻⁸
0.8	0.00570	0.0144	6.0	0.00340	1.690x10 ⁻⁵	5.74 x10 ⁻⁸
1.6	0.03700	0.0925	3.2	0.00606	3.090 x10 ⁻⁵	1.87 x10 ⁻⁷
3.2	0.04120	0.1030	7.0	0.00262	1.690 x10 ⁻⁵	4.42 x10 ⁻⁸
6.4	0.04820	0.1205	18.0	0.00095	1.140 x10 ⁻⁵	1.08 x10 ⁻⁸
Promedio				0.00378	1.72 x10 ⁻⁵	7.16 x10 ⁻⁸

Cuadro 21. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo Tuza.

p (Kg./cm ²)	Asentamiento		t ₅₀ (min)	C _y (cm ² /s)	m _v (cm ² /gr)	K (cm/s.)
	Pulg.	cm.				
0.2	0.0030	0.0076	9.0	0.00231	2.90 x10 ⁻⁵	6.69x10 ⁻⁸
0.4	0.0060	0.0153	5.4	0.00376	6.06 x10 ⁻⁵	2.27x10 ⁻⁷
0.8	0.0115	0.0294	9.8	0.00198	5.90 x10 ⁻⁵	1.17x10 ⁻⁷
1.6	0.0227	0.0576	14.0	0.00124	6.59 x10 ⁻⁵	8.17x10 ⁻⁸
3.2	0.0328	0.0833	19.0	0.00083	2.84 x10 ⁻⁵	2.35x10 ⁻⁸
Promedio				0.00202	4.85x10 ⁻⁵	9.8x10 ⁻⁸

Cuadro 22. Relación de coeficientes para un 50 % de consolidación. Suelo Puerta Roja.

p (Kg./cm ²)	Asentamiento		t ₅₀ (min)	C _y (cm ² /s)	m _v (cm ² /gr)	K (cm/s.)
	Pulg.	cm.				
0.4	0.0180	0.046	18	0.00108	9.51 x10 ⁻⁵	1.02x10 ⁻⁷
0.8	0.0278	0.071	16	0.00116	6.45 x10 ⁻⁵	7.48x10 ⁻⁸
1.6	0.0410	0.104	18	0.00097	3.76 x10 ⁻⁵	3.64 x10 ⁻⁸
3.2	0.0530	0.136	19	0.00085	2.15 x10 ⁻⁵	1.82 x10 ⁻⁸
6.4	0.0680	0.174	18	0.00083	1.32 x10 ⁻⁵	1.09 x10 ⁻⁸
Promedio				0.000978	4.64 x10 ⁻⁵	4.53 x10 ⁻⁸

4.9 ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS.

Esta propiedad mecánica de los suelos se determinó sobre muestras indisturbadas y los resultados de laboratorio se indican en el anexo 7.

Las relaciones esfuerzo normal - esfuerzo cortante de cada uno de los suelos se observan en las figuras 24, 25 y 26; en ellas se dibujó la recta de Coulomb que presentan un intercepto con el eje de la cizalladura y una pendiente intrínseca dependiente del ángulo de fricción interna de los suelos, indicativo de que los materiales experimentados son arcillosos y cohesivos. En las mencionadas gráficas se infiere que las curvas cortantes regresivas son particulares de cada suelo o sea que dependen primordialmente de las características de consistencia, de la magnitud de la preconsolidación, de su composición mineralógica y de las características de su estructura, según lo anterior, los suelos La Huerta y Puerta Roja tienen la recta muy parecida, mientras que la del suelo Tuza es menos inclinada y con menor intercepto en el eje cortante. La recta de Coulomb será siempre tangente a un círculo de falla según la teoría de Mohr-Coulomb.

Lo anterior se justifica si analizamos los parámetros últimos objetivados por el ensayo, como lo son la resistencia por cohesión y el ángulo de fricción interna de los suelos, En cuanto a la cohesión se refiere, se obtuvieron valores que oscilaron entre 0.3 y 0.7 Kg./cm² asociados con los suelos Tuza y Puerta Roja, y La Huerta respectivamente, para pesos unitarios secos entre 11.66 KN/m³ y 17.05 KN/m³; lo cual es indicativo de la resistencia de los suelos bajo esfuerzos principales nulos; los resultados de cohesión conseguidos son muy similares a los encontrados por Álvarez y Hernández, 1988, en predios de la ciudadela universitaria Puerta Roja.

Figura 24. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelos La Huerta.

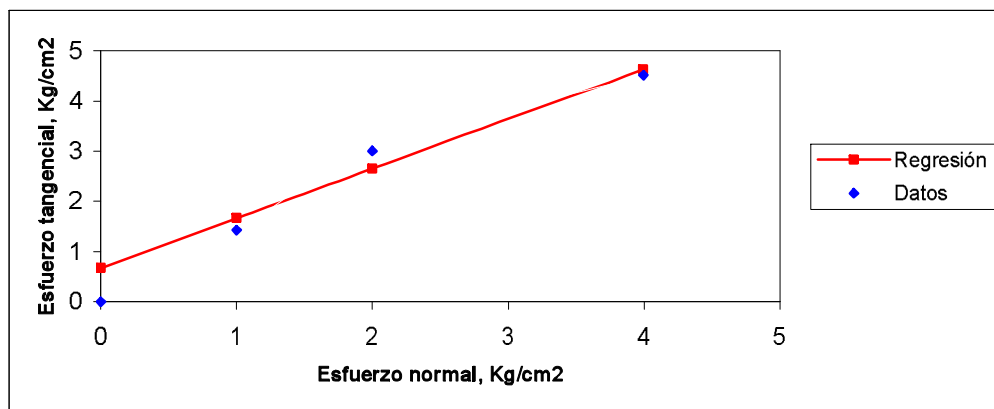


Figura 25. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelos Tuza.

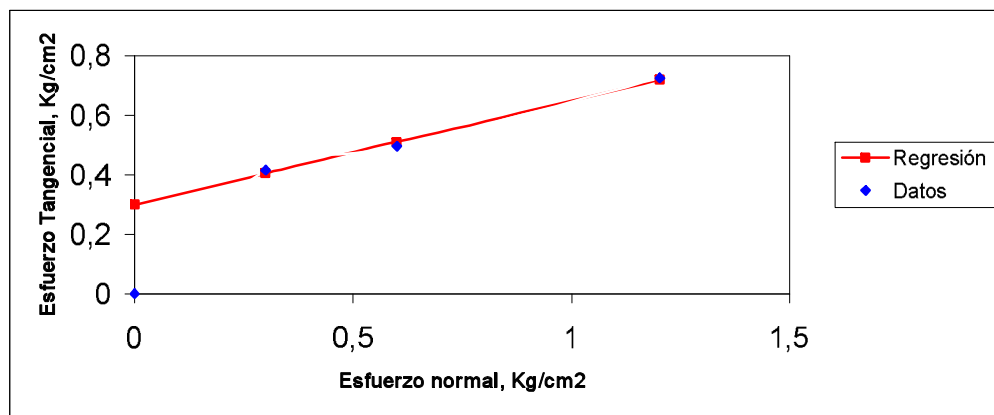
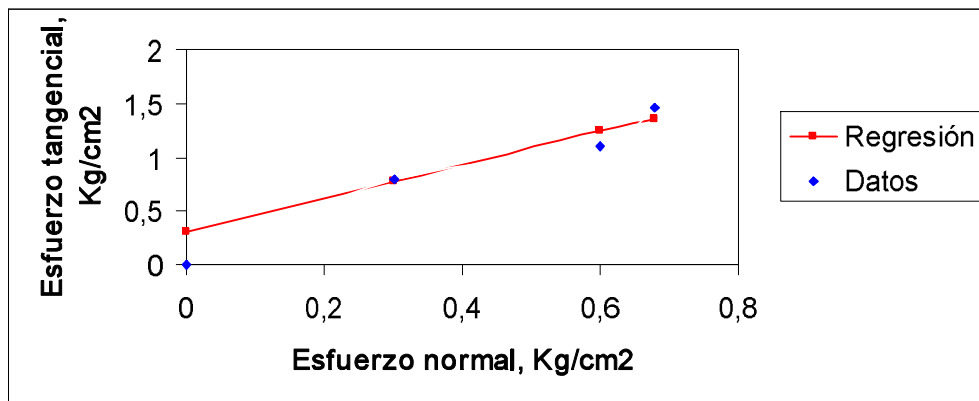


Figura 26. Esfuerzo normal vs. esfuerzo tangencial. Suelo Puerta Roja.



La cohesión y el ángulo de fricción interna se presentan en la tabla 6. En cuanto al ángulo de fricción interna se refiere se estimaron valores de 45 ° para los suelos La Huerta, 19 ° para los suelos Tuza y 57 ° para los suelos Puerta Roja. Estos valores de ϕ en estado inalterado están muy relacionados con el índice de plasticidad, la composición mineralógica y de otro lado el contenido de humedad, la velocidad de aplicación de las cargas y las condiciones de drenaje indican que el ángulo puede variar. Según Lo, 1962, citado por Terzaghi y Peck, 1980, en ciudad de México se obtuvo un valor excepcionalmente alto de $\phi = 47^\circ$ para una arcilla con límite líquido de 426 %.

Tabla 6. Cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ) y ecuación de corte

(Perfil)	Horizonte	Prof. (cm.)	γ_d gr/cm ₃	γ_d KN/m ³	C (Kg./cm ²)	ϕ (grado)	Ecuación de corte (unidades en Kg./cm ²)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	1.74	17.05	0.7	45°	$T = 0.7 + 0.9898 \tan \phi$
Tuza (P-2)	B	31-68	1.19	11.66	0.3	19°	$T = 0.3 + 0.3503 \tan \phi$
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	1.20	11.76	0.3	57°	$T = 0.3 + 1.5622 \tan \phi$

Los resultados de laboratorio también permitieron contrastar las relaciones esfuerzo cortante vs. deformación como se muestran en las figuras 27, 28 y 29, Tales figuras son importantes para analizar las fallas que pueden sufrir los materiales que hace que estos no cumplan en forma aceptable la función que se les puede asignar como subestructura. Para todos los suelos estudiados, las curvas esfuerzo-deformación obtenidas varían según la carga aplicada, siendo la curva mas alta, según el eje del esfuerzo la correspondiente a la mayor de aquellas seguida de la intermedia y por ultimo la menor. Cuando se presenta la falla, los especímenes de suelos usados colapsan, según el esfuerzo normal

aplicado, entre 1.43 Kg./cm² y 4.51 Kg./cm² (La Huerta), entre 0.41 Kg./cm² y 0.73 Kg./cm² (Tuza) y entre 0.79 Kg./cm² y 1.46 Kg./cm² (Puerta Roja); los datos anteriores indican que la mayor resistencia a la falla por cortante lo experimentó el suelo la Huerta, bajo esfuerzos normales de 4 Kg./cm²

Figura 27. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo La Huerta.

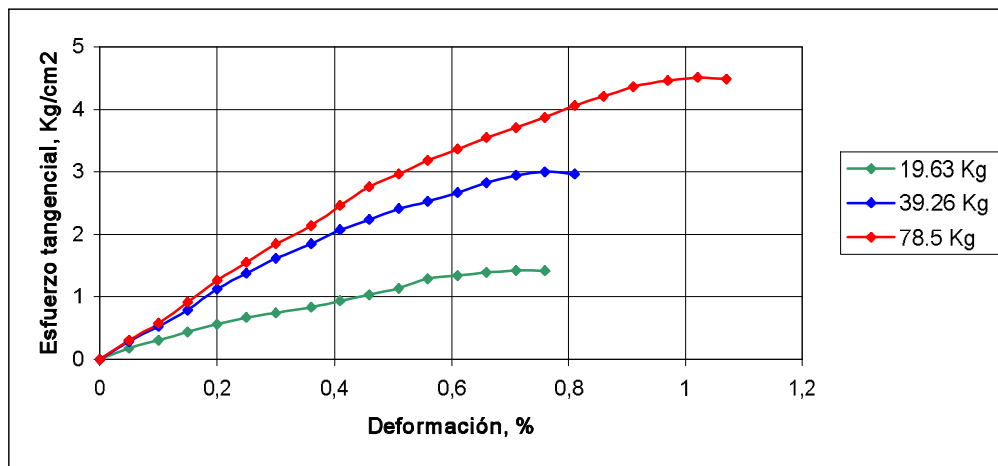


Figura 28. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo Tuza.

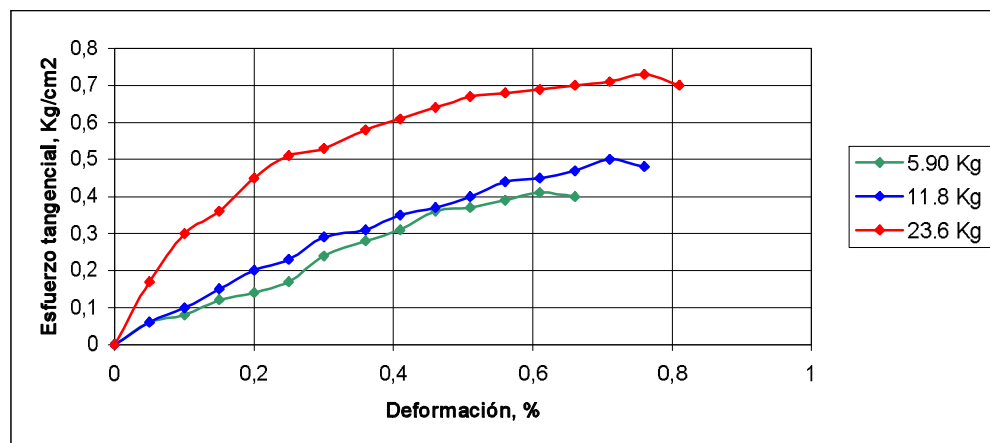
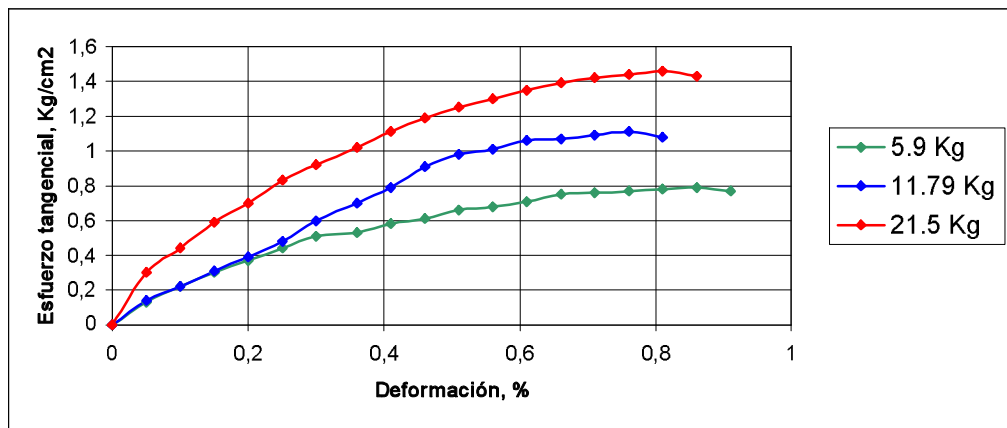


Figura 29. Esfuerzo cortante vs. deformación. Suelo Puerta Roja.



4.10 COMPRESIÓN INCONFINADA

Esta prueba se llevó a cabo en especímenes inalterados y remoldeados del horizonte seleccionado de cada uno de los perfiles; se fallaron sendas muestras de suelos en condición alterada o remoldeada y dos muestras de cada suelo en condición indisturbada, sacándose un promedio de la resistencia a la compresión simple (q_u) y de la cohesión (C). Los resultados aparecen en el anexo 8. el cual sirvió de base para elaborar el cuadro 23.

Realizando un análisis global de la resistencia a la compresión simple se observó que varió, teniendo en cuenta el promedio, entre, 0.66 Kg./cm^2 y 2.04 Kg./cm^2 para contenidos de humedad promedios entre 30.8 % y 38 %, y valores de densidad húmeda entre 1.47 gr./cm^3 y 2.5 gr./cm^3 . Estos valores de compresión simple están dentro del rango mencionado por Crespo, 2000 entre 1 y 5 Kg./cm^2 cuando los materiales tienen el contenido de humedad natural dentro del rango anteriormente citado. Por su parte la cohesión, (C) experimentó cambios promedios entre 0.33 y 1.02 Kg./cm^2 , condición acorde con los contenidos de humedad.

También se observó que los valores de la cohesión obtenidos en los especímenes inalterados dieron muy similares a los estimados en la prueba de resistencia al corte.

Analizando los resultados presentados en los suelos, se indica que el suelo La Huerta presentó una resistencia a la compresión simple y una cohesión mucho mayor que en los otros dos suelos, lo anterior se debe al menor contenido de humedad que tenían las muestras inalteradas de este suelo, mucho menor que el contenido de humedad de los otros.

Cuadro 23. Resistencia a la compresión simple (qu) y cohesión (C). Muestras alteradas e inalteradas de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Prof. (cm)	Muestra inalterada No. 1					Muestra inalterada No. 2					Promedio				Muestra alterada					
			W	γ _h	γ _d	qu	C	W	γ _h	γ _d	qu	C	W	γ _h	γ _d	qu	C	W	γ _h	γ _d	qu	C
			(%)	(gr./cm ³)	(gr./cm ³)	(Kg./cm ²)	(Kg./cm ²)	(%)	(gr./cm ³)	(gr./cm ³)	(Kg./cm ²)	(Kg./cm ²)	%	(gr./cm ³)	(gr./cm ³)	(Kg./cm ²)	(Kg./cm ²)	(%)	(gr./cm ³)	(gr./cm ³)	(Kg./cm ²)	(Kg./cm ²)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	22.5	1.15	0.93	1.8	0.90	39.1	2.17	1.56	2.28	1.19	30.8	1.66	2.04	1.02		37.4	1.77	1.29	1.69	0.84
Tuza (P-2)	B	31-68	36.0	3.04	2.23	0.8	0.40	40.0	1.98	1.42	0.86	0.23	38	2.51	0.83	0.41		37.1	1.86	1.35	1.03	0.51
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	30.3	0.92	0.70	0.5	0.25	45.1	2.02	1.39	0.83	0.41	37.7	1.47	0.66	0.33		42.9	1.89	1.32	1.10	0.55

En lo que respecta a los resultados de los especímenes alterados, se indica que la resistencia a la compresión inconfiada varió entre 1.03 Kg./cm² y 1.69 Kg./cm² respectivamente para los suelos Tuza y La Huerta. Igual comportamiento tuvo la cohesión que varió entre 0.51 Kg./cm² y 0.84 Kg./cm², todo bajo contenidos de humedad entre 37.1 % 42.9 % y peso unitario húmedo entre 1.86 gr/cm³ y 1.89 gr/cm³.

Comparando los resultados de la compresión simple y de la cohesión en estado inalterado y alterado, únicamente el suelo La Huerta responde al hecho de que entre mas estructurado este el suelo mayor será su resistencia y en parte su cohesión.

De los resultados de laboratorio se hicieron las figuras 30 y 31 que muestran las relaciones esfuerzo deformación de los suelos en condición inalterada y remoldeada respectivamente. Se ve en la primera figura mencionada que la curva esfuerzo-deformación superior es mas extensa en el eje de deformación que las otras dos, indicando con esto que el suelo La Huerta al cual corresponde tiene menos deformación cuando se le aplica una carga que los restantes suelos; los suelos Tuza manifiestan mejores relaciones esfuerzo-deformación que los suelos Puerta Roja, debido a su mayor peso unitario. Las curvas esfuerzo-deformación de los suelos en estado alterado expresan el mismo comportamiento de los suelos inalterados.

Una aproximación al estudio de la sensibilidad de una arcilla se hizo con la relación resistencia a la compresión simple inalterada: resistencia a la compresión simple alterada, obteniéndose valores adimensionales del parámetro, discriminados así: 1.20 para los suelos La Huerta, 0.80 para Tuza y 0.60 para Puerta Roja; según Peck et al, 2000, algunas arcillas con estructuras secundarias

que pueden caracterizarse como grietas, juntas, o superficies de resbalamiento, pueden tener sensibilidades menores que 1.0

Figura 30. Relaciones esfuerzo-deformación de los suelos inalterados.

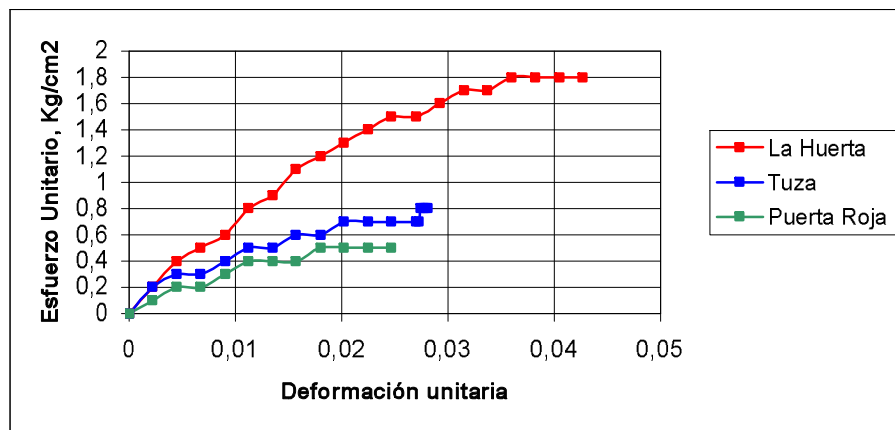
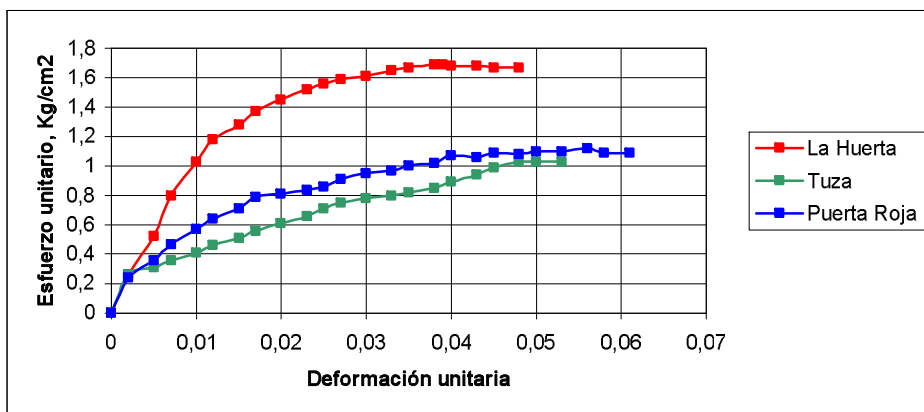


Figura 31. Relaciones esfuerzo-deformación de los suelos alterados.



4.11 ENSAYO DE SOPORTE DE CALIFORNIA C.B.R.

La resistencia al esfuerzo cortante y parámetros asociados de los suelos bajo condiciones de humedad y densidad controlada, que tiene aplicación principal en el diseño de pavimentos flexibles aparecen reportados por el laboratorio en el anexo 9. En este se encuentran registrados para cada uno de los suelos estudiados los resultados de los ensayos de compactación para 12, 25 y 55 golpes por capa, la expansión con sumersión en agua para cada uno de los tres ensayos de compactación ejecutados el ensayo de penetración, con su humedad y grafico penetración vs. carga, para cada uno de los tres ensayos realizados a 55, 25 y 12 golpes por capa. Toda la información anterior sirvió para elaborar el cuadro 24. Con el propósito de discutir organizadamente los resultados, estos se detallan así:

- **Ensayo de compactación.** Según indica el procedimiento para suelos arcillosos, se tomaron tres moldes para compactar el suelo a 12, 24 y 55 golpes respectivamente. Ya se presentaron y analizaron las relaciones humedad-densidad de los suelos para 55 y 25 golpes; ahora se hará para los distintos golpes dados por capas. Para el horizonte seleccionado de cada uno de los suelos estudiados, se observó que la curva de compactación para 55 golpes por capa es la que se encuentra en la parte superior del grafico densidad-humedad, mas abajo se encuentra la correspondiente a 25 golpes por capa y finalmente la de 12 golpes por capa, lo anterior indica como la energía de compactación tiene su efecto positivo en el manejo de los suelos a través de procedimientos mecánicos.

El contenido de humedad a saturación de todos los suelos varió entre 30.4 % y 44.2 %. Estos resultados según los golpes/capa, indican una tendencia de disminuir el porcentaje de humedad a saturación en la medida en que eso sucede. Las figuras 32, 33 y 34 siguientes muestran más claramente las situaciones.

Figura 32. γ_d vs. W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo La Huerta.

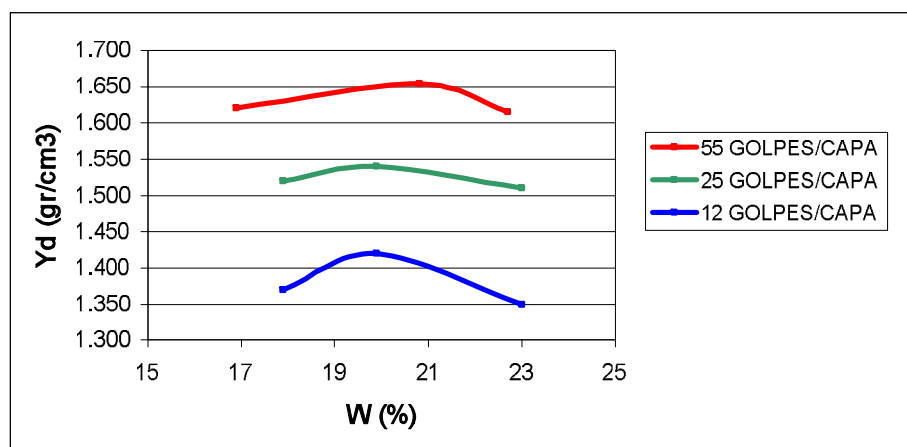


Figura 33. γ_d vs W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo Tuza.

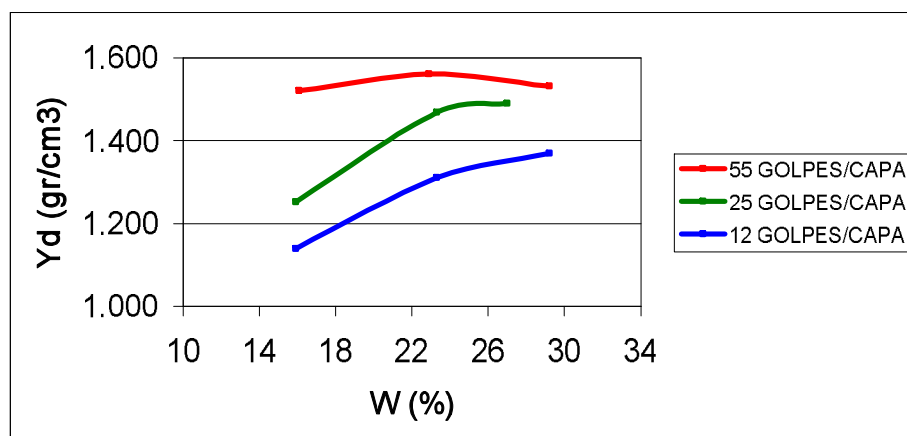
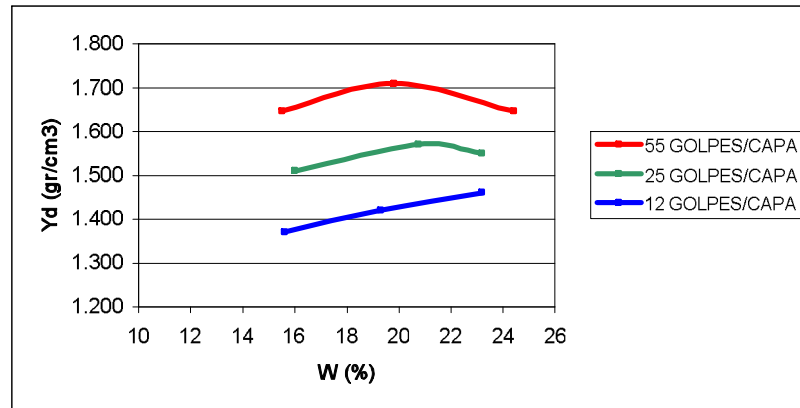
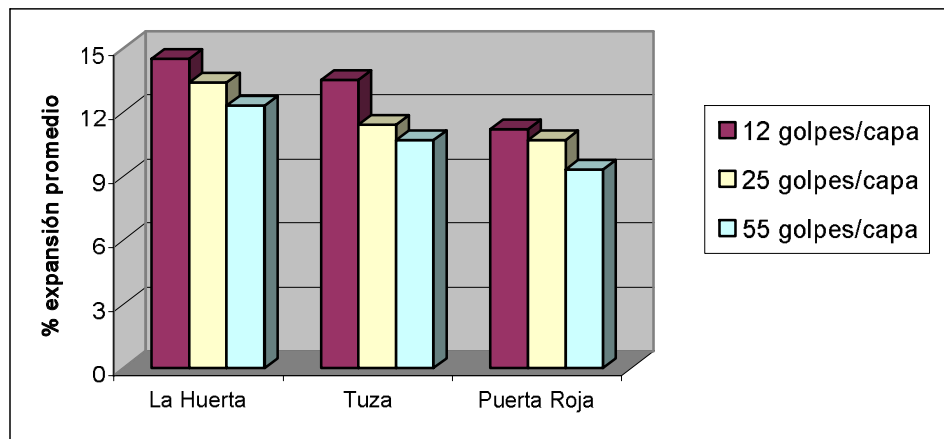


Figura 34. γ_d vs W, para 12, 25 y 55 golpes/capa. Suelo Puerta Roja.



- **Propiedades expansivas.** Según los resultados obtenidos el porcentaje de expansión de las arcillas varió entre 6.5 % y 15.7 %, al cabo de cuatro días de sumersión para la carga aplicada. En la figura 35 se representan las variaciones de la expansibilidad promedia, de los tres ensayos realizados para 12, 25 y 55 golpes/capa respectivamente es evidente que los materiales se hinchan mas cuando están menos compactados debido a la capacidad de imbibición mostrada por la supremacía de la porosidad. Según Valle, 1.964, los adobes, suelos orgánicos y algunos suelos cohesivos tienen expansiones muy grandes, generalmente mayores del 10 %; las especificaciones establecen, de una manera general, que los materiales de préstamo para sub-base deben tener expansiones menores del 2 % al cabo de 4 días, asimismo se recomienda que los materiales para base tengan expansiones menores del 1 %; además los suelos que tienen hinchamientos del 3 % o mas, siempre tienen C.B.R. menores del 9 %. Lo anterior indica que los suelos estudiados presentan limitaciones para su uso en este tipo de obras civiles.
- **Resistencia a la penetración de los suelos.** También el mencionado anexo permitió estudiar las relaciones existentes entre los esfuerzos aplicados y la

Figura 35. Expansión promedio según golpes/capa.



penetración ocurrida con el equipo. Las figuras 36, 37 y 38 muestran las variaciones para los suelos La Huerta, Tuza y Puerta Roja respectivamente, registrándose en ellas mayor resistencia a la penetración cuando el suelo fue compactado a 55 golpes/capa; aunque se hubiera podido mostrar todas las curvas generadas de los ensayos, se optó únicamente por graficar las relaciones esfuerzo penetración de uno de los tres moldes experimentados para 12, 25 y 55 golpes/capa respectivamente.

Figura 36. Curvas esfuerzo-penetración, suelo La Huerta.

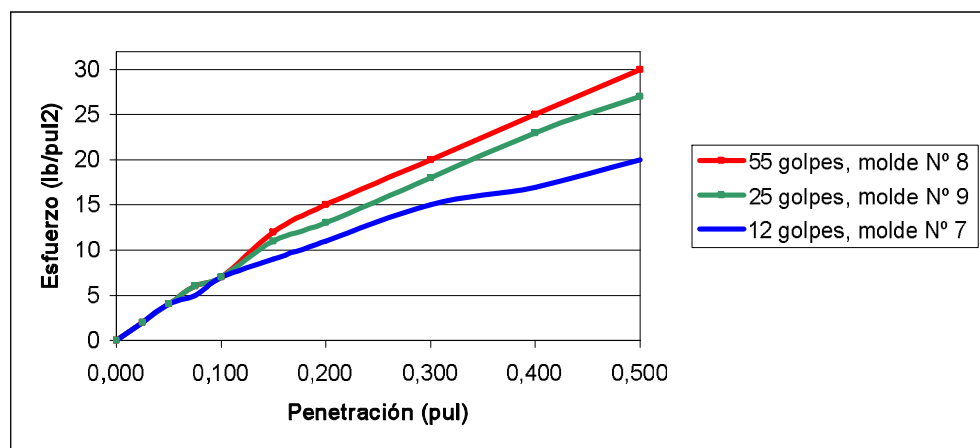


Figura 37. Curvas esfuerzo-penetración, suelo Tuza.

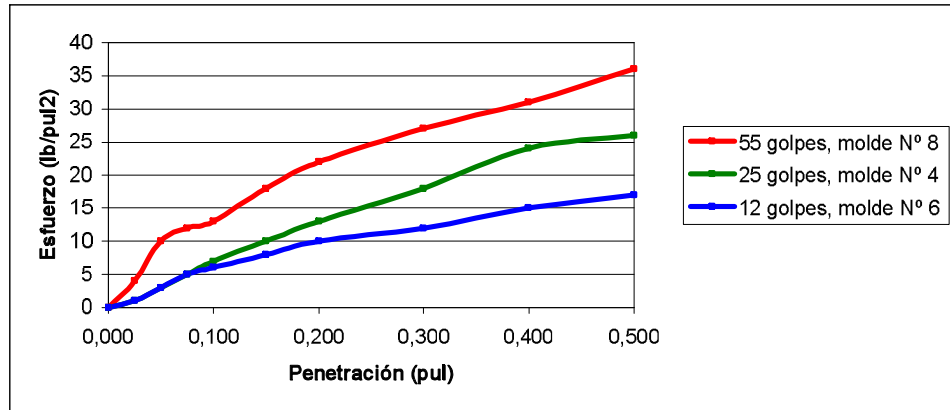
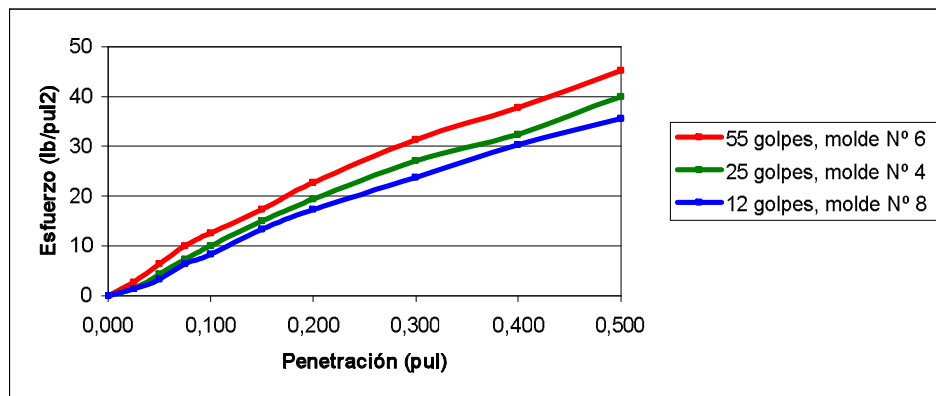


Figura 38. Curvas esfuerzo-penetración, suelo Puerta Roja.



- **C.B.R. (%) para 0.1" y 0.2" , y C.B.R. (%) seleccionado.** Los porcentajes de la relación de soporte variaron para todos los suelos así: entre 0.4 % y 1.5 % cuando la penetración fue de 0.1", y entre 0.4" y 1.6 % cuando la penetración fue de 0.2 " ; pero en la mayoría de los casos el C.B.R. conseguido para 0.1" fue menor que el obtenido para 0.2", decidiéndose seleccionar el C.B.R. de mayor valor absoluto o sea para 2" de penetración, tal como se observa en el cuadro inmediatamente anterior, ya mencionado.

- **C.B.R. (%) de diseño.** Con los valores de C.B.R. seleccionados, un total de 9 para cada suelo y el número de C.B.R iguales o mayores se calculó el porcentaje de valores mayores o iguales de C.B.R., tal como se indican en los cuadros 25, 26 y 27.

Cuadro 25. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo La Huerta.

C.B.R	Nº C.B.R iguales o mayores	% C.B.R (iguales o mayores)
0.4	9	100.0
0.7	7	77.7
0.9	5	55.5
1.0	2	22.2

Cuadro 26. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo Tuza.

Valores de C.B.R	Nº de valores de C.B.R iguales o mayores	% de valores de C.B.R (iguales o mayores)
0.5	8	100.0
0.7	7	88.0
1.1	5	62.5
1.3	2	25.0
1.5	1	12.5

Cuadro 27. Resumen de cálculos de % de valores de C.B.R. Suelo Puerta Roja.

Valores de C.B.R	Nº de valores de C.B.R iguales o mayores	% de valores de C.B.R (iguales o mayores)
0.5	9	100.0
0.7	8	88.9
0.8	7	77.7
1.1	6	66.6
1.2	5	55.5
1.3	4	44.4
1.4	3	33.3
1.5	2	22.2
1.6	1	11.1

Dichos guarismos se confrontaron gráficamente con el C.B.R. (ver figuras 39, 40 y 41). Estimándose inmediatamente como valores de C.B.R. de diseño cuando se van a usar los suelos sobre vías con tránsito pesado los siguientes: 0.58 % para La Huerta, 0.70 % para Tuza y 0.71 % para Puerta Roja. Estos resultados del ensayo de relación de soporte mostraron que la resistencia al corte de los suelos bajo condiciones de humedad y densidad controladas permiten clasificarlos como muy pobres cuando su uso está únicamente limitado a subrasantes bajo pavimentos de carreteras y aeropistas (Bowles, 1.981). También, según el mencionado autor, los C.B.R. determinados están dentro del rango para clasificar a los suelos como CH (U.S.C) y A-7 (A.A.S.H.TO.), entre otros, lo cual está en concordancia con lo encontrado en los suelos investigados.

Figura 39. Selección del C.B.R. de diseño, Suelo La Huerta.

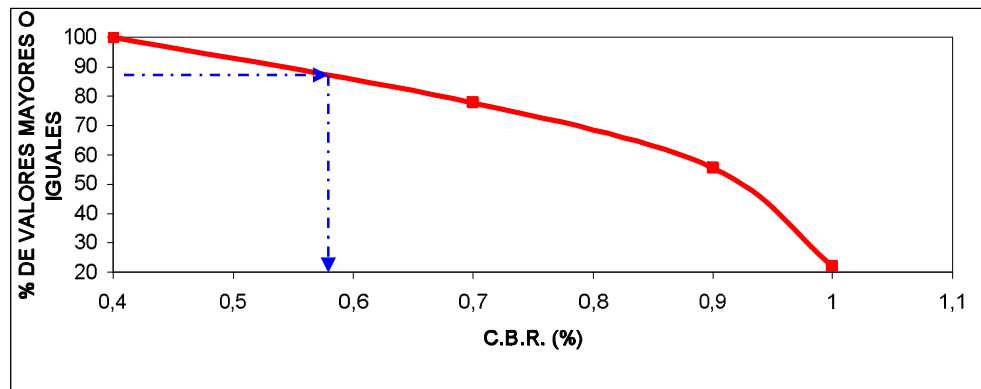


Figura 40. Selección del C.B.R. de diseño, Suelo Tuza.

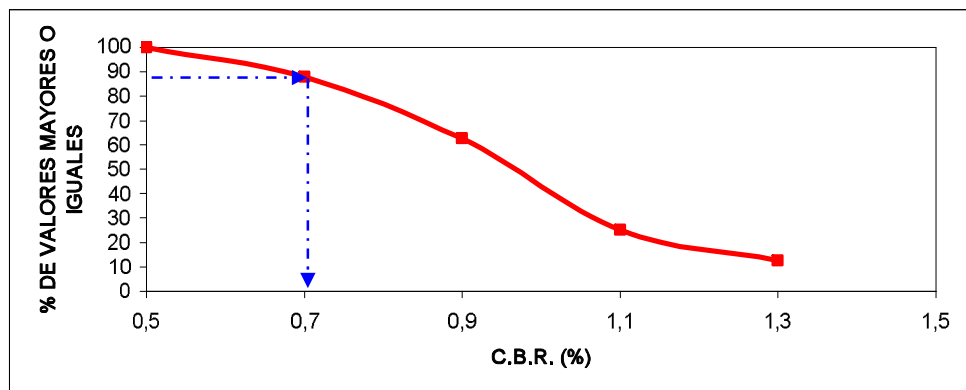
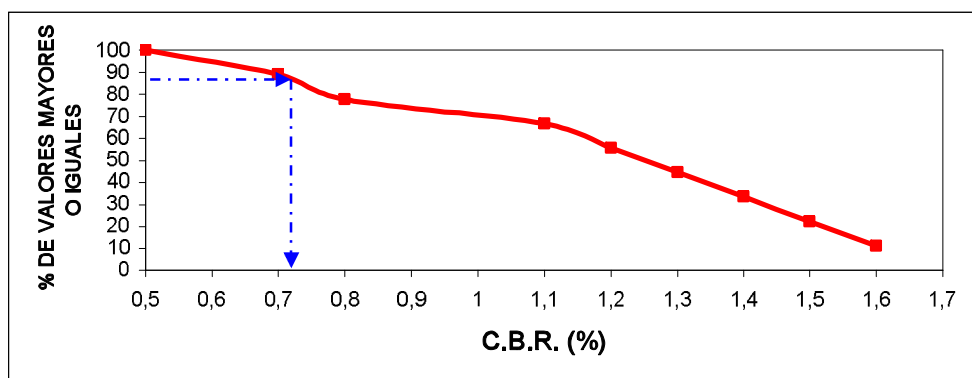


Figura 41. Selección del C.B.R. de diseño, Suelo Puerta Roja.



4.12 CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA (K).

El coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica de los materiales investigados aparece en los resultados de laboratorio identificados con el anexo 10, de donde se elaboró el cuadro 25, aquí también aparecen los resultados del coeficiente de conductividad hidráulica obtenidos a través de la prueba edométrica; los valores alcanzados fueron muy similares si tenemos en cuenta los dos métodos utilizados, el del permeámetro y el del edómetro. Así, para el primer método se tuvieron guarismos que variaron entre 6.55×10^{-6} cm./seg. (perfil 1) y 4.53×10^{-7} cm./seg. (perfil 2); mientras que para el segundo método mencionado el parámetro varió entre 9.83×10^{-7} cm./seg. (perfil 2) y 6.50×10^{-8} cm./seg. (perfil 1). Desde todo punto de vista según Terzaghi y Peck, 1983, los suelos son prácticamente impermeables con un grado de permeabilidad muy bajo, correspondientes a materiales arcillosos. Se decidió escoger el método edométrico como el más adecuado y aceptado, ya que suministra resultados buenos aunque necesita de mucha experiencia, en contraposición con el método del permeámetro que arrojó resultados de regulares a buenos y requiere de mucha experiencia.

Según los resultados edométricos el suelo que presenta la conductividad hidráulica mas baja es el suelo La Huerta y el que exhibe la más alta es el suelo Tuza. Lo anterior tiene que ver, primeramente con la granulometría imperante, arcilla en el primer caso y una arcilla con porcentajes de arena fina en el segundo caso; segundo, el grado de estructuración y porosidad que favorece el flujo mayor de agua en el suelo Tuza, y también teniendo en cuenta la rata de asentamiento con el tiempo (C_v)

Cuadro 28. Conductividad hidráulica, K, de los suelos.

Suelo (perfil)	Horizonte	Profundidad (cm.)	K (permeámetro) (cm./seg.)	K (edómetro) (cm./seg.)
La Huerta (P-1)	B2	57-85	6.55×10^{-6}	6.5×10^{-8}
Tuza (P-2)	B	31-68	8.37×10^{-6}	9.83×10^{-7}
Puerta Roja (P-3)	B1	30-51	4.53×10^{-7}	4.53×10^{-8}

5. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados permitió extraer las siguientes conclusiones:

- Los suelos estudiados muestran a través de la descripción de su perfil representativo características muy exclusivas de materiales fino granulares o pesados que tienen mineralógicamente, en la fracción arcilla, cantidades predominantes de montmorillonita (Esméctita), seguido de cuarzo coloidal, caolinita transportada ya que su ambiente de formación no es el existente, y otras cantidades menores de arcillas 2:1 , micáceas , posiblemente illíticas.
- En los perfiles representativos, a máximo un metro de profundidad, se encontró un horizonte o estrato de mucha presencia y actividad coloidal mineral; como lo son el B2 (suelo La Huerta), B (suelo Tuza) y B1 (suelo Puerta Roja), en los cuales se centró la identificación y máxima caracterización física.
- Se indica que todos los suelos presentan relaciones gravimétricas y volumétricas típicas de materiales arcillosos con gran porcentaje de minerales 2:1 esméctíticos, donde básicamente la naturaleza y el comportamiento de la estructura trilaminar, ante la dinámica del binomio agua-aire del suelo, define aquellas.
- El análisis de la gradación de los suelos reafirma el predominio, por peso del suelo, de la fracción arcilla, en más del 90 %; siendo por lo tanto uniformes. Se notó que la situación geomorfológica de los suelos La Huerta y Tuza, en zonas de influencia del arroyo Grande de Corozal, tiene que ver con la existencia de bajos porcentajes de gravas y arenas finas en su composición granulométrica.

- La mineralogía imperante reporta características de consistencia típicas de arcillas 2:1. Se detectó que el estado plástico de los materiales esta enmarcado por un limite de plasticidad entre 24 % y 28%, y un limite liquido de hasta 83 % que le dan una alta cohesión y plasticidad a los suelos. Además las arcillas presentaron una actividad normal pero con un alto potencial de expansión-contracción expresado por el COEL, que tiene valores desde 0.13 en adelante. A nivel superficial y si la estructura se encuentra degradada, la consistencia imperante define problemas asociados con la emergencia de las plantas e incremento del agua de escorrentía, porque se tiene un módulo de ruptura mayor que 21000 dinas/cm².
- En un primer intento para definir las características físicas de las arcillas, se puede partir de la clasificación unificada que las agrupa como materiales CH; y de la clasificación A.A.S.H.T.O que las describe como A-7-6, con baja aptitud para su uso único en subrasante de vías.
- La deformación compresiva de los suelos con el fin de darle mejores propiedades como materiales para la ingeniería, al volverlos mas resistentes y menos compresibles , se puede hacer densificándolos mecánicamente con contenidos de humedad óptimos y pesos unitarios secos máximos que dependen del numero de golpes dados por capas dentro de la metodología de Proctor modificado. De esa manera para 55 golpes aplicados por capa los materiales se densifican hasta más o menos 16 KN/m³ cuando se manejan con humedades óptimas de alrededor del 20 %.
- El fenómeno de consolidación unidimensional, practicado a los suelos en el laboratorio, reflejó en cuanto a la deformación compresiva primaria se refiere que las cargas impuestas disminuyeron el volumen de vacíos a tasas entre 5.2×10^{-5} cm²./gr. y 1.04×10^{-4} cm²./gr., lo que en términos del volumen total del

suelo representó variaciones entre $9.97 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ y $1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gr.}$ y con referencia a asentamientos oscilaciones máximas entre 0.25 cm. y 0.40 cm. Los materiales presentan naturaleza preconsolidada debido a su posición en el perfil y a los procesos de geodinámica externa a que han sido sometidos. La rapidez de la consolidación observada para un tiempo de 50 minutos arrojó tasas de asentamientos promedios en los suelos entre $9.78 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s.}$ y $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s.}$; con grados de consolidación que variaron máximamente, para un 50 % de consolidación, entre 0.23 cm. y 0.36 cm.

- Las esméctitas estudiadas presentan una resistencia por cohesión de hasta 1.02 Kg./cm^2 , según muestran los ensayos de corte y de compresión inconfiada; al respecto los suelos mas cohesivos fueron los de La Huerta. Esta condición da a los suelos una resistencia a la compresión axial sin confinar entre 0.66 Kg./cm^2 y 2.04 Kg./cm^2 , bajo ángulos de fricción interna entre 19° y 57° . La organización estructural floculada intima de las arcillas influye para que estas presenten mayor resistencia que cuando se alteran, manifestándose este fenómeno a través de su carácter normalmente sensible
- Evaluando la calidad de los materiales para su uso como base y subrasante bajo pavimentos de carreteras se concluyó que estos son muy pobres para su uso en subrasantes de vías, requiriéndose manejo de campo para obtener C.B.R. de diseño entre 0.58 % y 0.71 %, bajo potencial de expansión oscilando entre 6.5 % y 15.7 %.
- El flujo del agua, en condición saturada, bajo los supuestos de la ley de Darcy, se estimó como muy bajo debido, prioritariamente, al tipo de arcilla presente. Se considera que los resultados de la conductividad hidráulica obtenidos a través de la prueba edométrica son mas confiables, menos dudosos e imposibles que los conseguidos por el método del permeámetro, ya que los

materiales son muy impermeables. Por lo tanto la tasa de salida lenta del agua de los suelos permite que cuando aquellos estén saturados absorban altas presiones efectivas debido a las cargas naturales y artificiales impuestas, siendo esto peligroso cuando se aplica el drenaje.

6. RECOMENDACIONES

El análisis de los resultados y las conclusiones a las que se llegó permiten sugerir lo siguiente:

- Se deben seguir realizando investigaciones asociadas con la naturaleza y el comportamiento geotécnico y agronómico de la gran mayoría de este tipo de suelos existentes en diferentes zonas del Departamento, tanto urbanas como rurales. Los estudios deben estar dirigidos por un cuerpo de profesionales interdisciplinarios que obtengan los levantamientos de suelos con información de la mineralogía, propiedades físicas, químicas, biológicas, geomorfológicas, taxonómicas y cartográficas definitorias de su uso y manejo.
- Los suelos estudiados, si se van a usar in situ como infraestructura de obras civiles, deben ser estabilizados prioritariamente con métodos químicos, realizando los diseños de las cimentaciones más adecuados, que tengan en cuenta sus características de esfuerzo-deformación, asentamiento y permeabilidad.
- Se recomienda para el uso y manejo adecuado de los suelos arcillosos de las ciudades de Sincelejo y Corozal y otras zonas del Departamento, partir siempre del análisis mineralógico de la fracción arcilla y arena de los materiales, que junto con la información que se tenga de tipo pedogenético servirán como criterios iniciales básicos.
- Las características índices de los suelos como son, la consistencia, el tamaño y la mineralogía permiten recomendar que los suelos se mecanicen bajo contenidos de humedad óptimos. Al respecto se indica la necesidad de

investigar el contenido de humedad, la cohesión y adhesión asociadas con el punto de mecanización de estas arcillas.

- Como los suelos estudiados tienen una situación geomorfológica en valles y terrazas bajas del arroyo Grande de Corozal y sus tributarios , y siendo este actualmente un foco de contaminación química y biológica, se sugiere evitar que las aguas del mencionado arroyo pertenezcan a la fase líquida de dichos suelos, ya que aniones y cationes residuales tóxicos se pueden apoderar del complejo de cambio de las arcillas y permanecer allí por mucho tiempo, siendo esto un banco de contaminación a largo plazo tanto para plantas , animales y el hombre, así como para las futuras aguas depuradas del arroyo.

BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ, J. y HERNÁNDEZ O. 1.998. Comportamiento mecánico de las arcillas 2:1 en presencia de diferentes cationes en la doble capa difusa. Universidad de Sucre. Tesis de grado. Sincelejo.

ALVIZ, H. et. al, 1.988. Estudio detallado de suelos de la granja El Perico y de la Ciudadela Universitaria Puerta Roja. Tesis de grado. Universidad de Sucre. Sincelejo.

BOWLES, J. 1.978. Manual de laboratorio de suelos de ingeniería civil. Mc Graw-Hill Latinoamericana. Bogotá.

CÁRDENAS, G. 1.983. Propiedades ingenieriles de los suelos. Universidad Nacional – Seccional Medellín. Medellín.

CRESPO, C. 2000. Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes. 3ra Ed. Limusa/Noriega. México.

FEFERBAUM, Z. 1992. Aspectos de la consolidación de suelos cohesivos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

FERNANDEZ, C. 1982 Mejoramiento y estabilización de suelos. Ed. Limusa, México.

JUÁREZ, E. y A. RICO. 1.999. Mecánica de suelos. Tomo I. 3ª ed. Editorial Limusa, México.

LAMBE, W y WHITMAN, R. Mecánica de suelos. 2ª ed. Limusa. México

LIBARDI, P. 1.995. Dinámica da agua no solo. Universidad de Sao Paolo. Departamento de física e meteorología. Sao Paolo (Brasil).

MALAGÓN, D. 1975. Mineralogía de suelos. Sus relaciones con génesis, fertilidad y clasificación de suelos. I.G.A.C. Bogotá.

MALAGÓN, D. y H. MONTENEGRO. 1990. Propiedades físicas de los suelos. I.G.A.C. Bogotá.

MALAGÓN, D., C. PULIDO, et al. 1995. Suelos de Colombia. Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. I.G.A.C. Bogotá.

MARQUEZ, G. 1.983. Propiedades ingenieriles de los suelos. Universidad Nacional-Seccional Medellín. Medellín.

MORELO J. 1.983. Génesis y Taxonomía. En: Estudio general de suelos de la región noroccidental del Departamento de Sucre – I.G.A.C. Bogotá.

PECK, R. Et al, 2.000. Ingeniería de cimentaciones. Editorial Limusa, México.

PULIDO, C. 1.983. Propiedades mineralógicas. En: Estudio general de suelos de la región noroccidental del Departamento de Sucre – I.G.A.C. Bogotá.

RAMOS, H. 1.992. Estudio geotécnico para construcción del Colegio San Ignacio (Corozal-Sucre). Ingeniería e investigaciones Ltda.

ROJAS, A. 1.990. Criterios en la interpretación de análisis mineralógico de arcillas. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego – Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 2ª edición, Bogotá.

RODRÍGUEZ, C. 1.983. Propiedades de los suelos. En: Estudio general de suelos de la región noroccidental del Departamento de Sucre – I.G.A.C. Bogotá.

TERZAGHI, K. Y PECK, R. 1.973. Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. Editorial El Ateneo. Barcelona.

VALLE, R, RAUL. 1.964 Carreteras, calles y aeropistas. 4ª ed. Editorial El Ateneo. México.

ANEXOS