



Libertad y Orden

INSTITUTO COLOMBIANO DE  
GEOLOGIA Y MINERIA  
INGEOMINAS



DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO  
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE  
DAGMA

**INGEOMINAS  
SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y  
ENTORNO AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA  
DE SANTIAGO DE CALI**

*Convenio No.02 de 2002*

**SUBPROYECTO DE GEOTECNIA**

**Informe 4  
Investigaciones y Zonificación Geotécnica  
de la Ciudad de Santiago de Cali**

Bogotá, Diciembre de 2005

República de Colombia  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA  
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS



**JULIAN VILLARRUEL TORO**  
**DIRECTOR GENERAL INGEOMINAS**

**INES F. CAICEDO HERNANDEZ**  
**DIRECTORA DAGMA**

**ALBERTO NUÑEZ TELLO, DIRECTOR TECNICO SERVICIO GEOLOGICO, INGEOMINAS**  
**MARTA L. CALVACHE VELASCO, SUBDIRECTORA AMENAZAS GEOLOGICAS, INGEOMINAS**  
**CARLOS E. ALVARADO FLOREZ, JEFE DE PROYECTO, INGEOMINAS**

**GRUPO TECNICO INGEOMINAS**

**JACOBO OJEDA, LIDER TEMATICO**  
**FERNANDO DIAZ, LIDER TEMATICO**  
JESUS GARCIA  
CARLOS ALVARADO

**GRUPO DE LABORATORIO DE SUELOS, INGEOMINAS**

GUILLERMO AVILA  
MANUEL CAVIEDES  
ABEL PENAGOS  
FRANCISCO URIBE

**Apoyo Técnico**

Laboratorio de Suelos, Universidad de San Juan, Argentina  
Germán Villafañe, UNIVALLE  
Alejandro Ulloa, Consorcio Ulloa - Cali

**EDICION FINAL, INGEOMINAS**

ANA I. ALVARADO  
JESUS SANDOVAL  
ROSA DAZA



## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	3
1.2 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	3
1.3 METODOLOGIA .....	4
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>6</b>
<b>BASE DE DATOS GEOTECNICA DE LA CIUDAD DE CALI</b> .....	<b>6</b>
2.1 IMPLEMENTACIÓN Y ALIMENTACIÓN .....	6
2.1.1 Compilación de la información disponible .....	6
2.1.2 Estructuración de la Base de Datos Geotécnica BDG .....	6
2.1.3 Alimentación de la BDG .....	7
2.1.4 Corrección de la BDG .....	7
2.1.5 Resultados .....	7
2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....	8
2.2.1 Clasificación de muestras por USCS-ASTM D 2487-98 .....	8
2.2.2 Materiales de análisis .....	11
2.2.3 Mapas de Materiales Tipo .....	12
2.2.4 Estadísticas por Materiales Tipo .....	17
2.2.5 Mapa de Perfiles Geotécnicos Típicos Superficiales .....	18
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>24</b>
<b>INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO</b> .....	<b>24</b>
3.1 PERFORACIONES MECÁNICAS .....	24
3.2 ENSAYOS DE CAMPO .....	28
3.2.1 Piezocono Sísmico - Prueba CPTU .....	29
3.2.1.1 Descripción de la prueba .....	30
3.2.1.2 Identificación del tipo de suelo .....	30
3.2.1.3 Parámetros de resistencia y compresibilidad .....	33
3.2.2 Dilatómetro DMT .....	34
3.2.2.1 Descripción de la prueba .....	35
3.2.2.2. Parámetros primarios .....	36
3.2.2.3 Parámetros de Resistencia .....	37
3.2.2.4 Parámetros de deformación .....	37
3.2.3 Cono dinámico CPT .....	39
3.2.3.1 Parámetros calculados .....	40
3.2.4 Ensayos Down Hole .....	40
3.2.4.1 Metodología de la prueba .....	40
3.2.4.2 Resultados de la prueba .....	44
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>46</b>
<b>ENSAYOS DE LABORATORIO</b> .....	<b>46</b>
4.1 ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD .....	46
4.2 RESISTENCIA AL CORTE .....	50



4.3 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO .....	53
4.4 ENSAYOS CONSOLIDADOS NO DRENADOS CU .....	55
4.5 ENSAYOS TRIAXIALES DINÁMICOS .....	56
4.5.1 Suelos arcillosos y limosos .....	56
4.5.2 Suelos Arenosos .....	60
4.5.3 Suelos Gravosos .....	61
<b>CAPITULO 5 .....</b>	<b>65</b>
<b>PERFILES Y SECCIONES GEOTÉCNICAS .....</b>	<b>65</b>
5.1 PERFILES GEOTÉCNICOS .....	65
5.1.1 Columnas Estratigráficas .....	65
5.1.2 Materiales Típicos .....	69
5.1.3 Caracterización Geomecánica .....	70
5.1.3.1 Materiales arcillosos .....	71
5.1.3.2 Materiales limosos .....	73
5.1.3.3 Materiales Arenosos .....	76
5.1.3.4 Materiales Gravosos .....	78
5.1.3.5 Materia orgánica .....	78
5.2 SECCIONES GEOTÉCNICAS .....	78
<b>CAPITULO 6 .....</b>	<b>84</b>
<b>ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA .....</b>	<b>84</b>
6.1 SÍNTESIS E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN .....	84
6.2 COBERTURAS DE INFORMACIÓN .....	86
6.2.1 Modelo Digital del Terreno (MDT) .....	86
6.2.2 Geología y Geomorfología .....	86
6.2.3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) .....	86
6.2.4 Gravimetría .....	90
6.2.5 Microtrepidaciones .....	90
6.2.6 Base de Datos Geotécnica (BDG) .....	90
6.2.7 Exploración Geotécnica .....	90
6.2.8 Secciones Típicas Geotécnicas (STG) .....	90
6.2.9 Cruces temáticos .....	95
6.3 ZONAS GEOTÉCNICAS PROPUESTAS .....	95
6.3.1 Zona 1a. Roca y material intermedio volcánico .....	95
6.3.2 Zona 1b. Roca y material intermedio sedimentario .....	99
6.3.3 Zona 2a. Flujo Terrón Colorado .....	100
6.3.4 Zona 2b. Flujo Alto Nápoles .....	101
6.3.5 Zona 2c. Flujo Cañas Gordas .....	101
6.3.6 Zona 3. Suelo Residual .....	102
6.3.7 Zona 4. Suelo Coluvial .....	103
6.3.8 Zona 5. Depósito de Piedemonte .....	104
6.3.9 Zona 6a. Abanico de Menga y de El Bosque .....	104
6.3.10 Zona 6b. Abanico Medio de Cali .....	106
6.3.11 Zona 6c. Abanico Distal de Cali .....	107
6.3.12 Zona 6d. Abanico de Cañaveralejo .....	107
6.3.13 Zona 6e. Abanico de Meléndez y Lili .....	108
6.3.14 Zona 6f. Abanico de Pance .....	108
6.3.15 Zona 7. Transición Abanicos - Llanura .....	109
6.3.16 Zona 8a. Llanura aluvial .....	111
6.3.17 Zona 8b. Relleno de Cauce y Zonas Desecadas .....	112



6.3.18 Zona 8c. Cauce antiguo .....	112
6.3.19 Zona 9. Cauces activos y terrazas.....	113
6.3.20 Zona 10. Depósitos Antrópicos.....	113
<b>CAPITULO 7 .....</b>	<b>115</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>CAPITULO 8 .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>118</b>



754

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Aspectos geotécnicos básicos (Adaptado de Burland, 1987).....	2
<b>Figura 1.2.</b> Metodología General de Zonificación Geotécnica.....	4
<b>Figura 2.1.</b> Diagrama Entidad – Relación de la BDG.....	7
<b>Figura 2.2.</b> Distribución de Estudios de Suelos por firma consultora.....	9
<b>Figura 2.3.</b> Histograma de profundidad de exploraciones.....	10
<b>Figura 2.5.</b> Distribución de estratos superficiales de materiales Finos (Arcillas y Limos).....	14
<b>Figura 2.6.</b> Distribución de estratos superficiales de materiales Arenosos.....	15
<b>Figura 2.7.</b> Distribución de estratos superficiales de materiales Gravosos.....	16
<b>Figura 2.8.</b> Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Finos.....	19
<b>Figura 2.9.</b> Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Arenas.....	20
<b>Figura 2.10.</b> Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Gravas.....	21
<b>Figura 3.1.</b> Localización de Trabajos de Exploración Geotécnica.....	25
<b>Figura 3.2.</b> Ejemplo de diseño de un piezocono y la influencia de la presión de poros sobre los valores medidos de resistencia por punta y fricción en el manguito (Larsson & Mulabbic, 1991).....	31
<b>Figura 3.3.</b> Carta de clasificación del tipo de comportamiento del suelo basada en datos normalizados de CPT/CPTU (Robertson, 1990) (Tomada de Guerrero, 2002).....	33
<b>Figura 3.4.</b> Ábaco $\phi$ , $K_0$ y $q_c$ de acuerdo a Durgunoglu & Mitchel (compilado por (Marchetti, 1975))...	38
<b>Figura 3.5.</b> Relación entre el módulo de corte $G_{sc}$ obtenido a partir del cono sísmico y $E_D$ del DMT contra $K_0$ para suelos arenosos (Tanaka & Tanaka, 1998).....	39
<b>Figura 3.6.</b> Esquema explicativo de la ejecución del Ensayo Down Hole.....	42
<b>Figura 4.1.</b> Estadísticas generales de los resultados de Laboratorio de Suelos (1).....	48
<b>Figura 4.2.</b> Estadísticas generales de los resultados de Laboratorio de Suelos (2).....	49
<b>Figura 4.3.</b> Curvas típicas de consolidación de Limos, Arcillas y Arenas.....	51
<b>Figura 4.4.</b> Variación de la RSC con la profundidad.....	52
<b>Figura 4.5.</b> Variación de la presión de expansión con el contenido de humedad.....	53
<b>Figura 4.6.</b> Compresiones inconfiadas de Arcillas y Limos.....	54



<b>Figura 4.7. Cortes Directos de Arcillas .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 4.8. Triaxial Consolidado No Drenado del Limo de Velódromo.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 4.9. Triaxial Consolidado No Drenado de la Arcilla de Villa del Sur .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 4.10. Triaxial Consolidado No Drenado de la Arena de Villa del Sur .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 4.11. Triaxial Cíclico de la Arcilla del Velódromo.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 4.12. Triaxial Cíclico de la Arena de Villa del Sur.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 4.13. Triaxial Cíclico de la Gravilla de Navarro.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 4.14. Curvas de resistencia cíclica de materiales granulares de la Ciudad de Cali, entre otras. 64</b>	
<b>Figura 5.1. Estadísticas de los materiales arcillosos (1) .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 5.2. Estadísticas de los materiales arcillosos (2) .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 5.3. Estadísticas de los materiales limosos (1) .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 5.4. Estadísticas de los materiales limosos (2) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 5.5. Estadísticas de los materiales arenosos (1).....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 5.6. Estadísticas de los materiales arenosos (2).....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 5.7. Estadísticas de los materiales gravosos (1).....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 5.8. Estadísticas de los materiales orgánicos (1).....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 5.9. Estadísticas de los materiales orgánicos (2).....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 5.10. Localización de las Secciones Geotécnicas Indicativas realizadas en la Ciudad de Cali..</b>	<b>83</b>
<b>Figura 6.1. Proceso Metodológico Detallado para la Zonificación Geotécnica de Cali con propósitos de Respuesta Sísmica.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 6.3. Modelo Digital del Terreno.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 6.4. Unidades Geológicas Superficiales .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 6.5. Espesores del depósito cuaternario.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 6.6. Anomalías Residuales Gravimétricas .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 6.7. Isoperiodos por Microtrepidaciones .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 6.8. Perfiles Típicos Superficiales a partir de la BDG.....</b>	<b>94</b>



<b>Figura 6.9.</b> Superposición de Modelo Digital del Terreno (MDT), Unidades Geológicas superficiales (UGS), Perfiles Típicos Superficiales (PTS) y Secciones Típicas Geotécnicas (STG) .....	96
<b>Figura 6.10.</b> Superposición de Anomalías Residuales Gravimétricas (ARG) e Isoperiodos (ISP).....	97
<b>Figura 6.11.</b> Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de los cerros	105
<b>Figura 6.12.</b> Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de abanicos..	110
<b>Figura 6.13.</b> Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de Llanura. ...	114

Nota: Figuras Nos. 2.4, 2.11, y 6.2 anexas.

### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Fuentes de información para la alimentación de la BDG.....	6
<b>Tabla 2.2.</b> Cantidad de información ingresada a la BDG .....	9
<b>Tabla 2.3.</b> Características generales sobre la exploración y muestreo en los estudios de suelos .....	10
<b>Tabla 2.4.</b> Densidad de información por Km <sup>2</sup> .....	11
<b>Tabla 2.5.</b> Clasificación de los Materiales .....	12
<b>Tabla 2.6.</b> Estadísticas generales de los estratos de los Materiales Tipo .....	13
<b>Tabla 2.7.</b> Agrupación por Perfiles Tipo .....	22
<b>Tabla 3.1.</b> Características de las Perforaciones Geotécnicas realizadas en la ciudad de Cali .....	26
<b>Tabla 3.2.</b> Relación de Sondeos con Piezocono .....	29
<b>Tabla 3.3.</b> Correlaciones utilizadas para SPT, CPTU y DMT (García, 2003) .....	41
<b>Tabla 3.4.</b> Relación de Pruebas de Down Hole (DH).....	45
<b>Tabla 4.1.</b> Relación de ensayos de laboratorio de suelos realizados por el Proyecto MZSCali. ....	47
<b>Tabla 5.1.</b> Materiales Típicos Arcillosos .....	69
<b>Tabla 5.2.</b> Materiales Típicos Limosos.....	69
<b>Tabla 5.3.</b> Materiales Típicos Arenosos .....	70
<b>Tabla 5.4.</b> Materiales Típicos Gravosos.....	70
<b>Tabla 5.5.</b> Materiales Típicos Orgánicos.....	70
<b>Tabla 5.6.</b> Propiedades promedio de los materiales arcillosos .....	73



<b>Tabla 5.7.</b> Propiedades promedio de los materiales limosos .....	73
<b>Tabla 5.8.</b> Propiedades promedio de los materiales limosos .....	78
<b>Tabla 5.9.</b> Propiedades promedio de los materiales gravosos.....	79
<b>Tabla 5.10.</b> Propiedades promedio de los materiales orgánicos.....	81
<b>Tabla 5.11.</b> Secciones Geotécnicas Indicativas.....	82
<b>Tabla 6.1.</b> Temáticas del Proyecto a nivel local articuladas bajo ArcSIG.....	87
<b>Tabla 6.2.</b> Zonas Geotécnicas definidas en la ciudad de Cali con propósitos de evaluar la respuesta sísmica local.....	98

## ANEXOS

Anexo 1	Propiedades de las entidades y atributos de la Base de Datos Geotécnica
Anexo 2	Exploración Geotécnica
Anexo 3	Resultados de Laboratorio
Anexo 4	Perfiles y Secciones Geotécnicas
Anexo 5	Estadísticas de las Zonas Geotécnicas



---

## CAPITULO 1

---

### INTRODUCCION

La zonificación geotécnica hace parte del proceso que conduce a la microzonificación sísmica de un territorio, siendo una de las actividades inmediatamente anteriores a los análisis y modelamiento de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo. Este informe, realizado para el Proyecto Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (MZSCali) en el marco del Convenio INGEOMINAS - DAGMA, presenta las labores de exploración geotécnica del subsuelo, así como los aspectos conceptuales y metodológicos de la zonificación geotécnica de la ciudad de Cali, enfocada hacia la obtención de la respuesta sísmica de la misma.

En general, la geotecnia es una rama de la Ingeniería Civil que se ocupa del análisis y diseño de estructuras geotécnicas, con base en el estudio del comportamiento de los suelos y rocas en términos de su resistencia mecánica, deformación y permeabilidad a los fluidos, tanto en condiciones naturales como cuando estas son modificadas por el hombre. Así mismo, cada una de estas características se expresan por medio de parámetros de resistencia, deformación y permeabilidad respectivamente, que se obtienen a partir de ensayos de campo, laboratorio e instrumentación. Es así como por medio de este tipo de estudios se determinan, por ejemplo, la resistencia de un suelo -o roca- para soportar el peso de una edificación, o el movimiento que este sufriría por la deformación del suelo; la inclinación -o altura- de un talud para que no falle; las cargas que deberá soportar un estructura de contención, o la cantidad de agua y presiones de ésta al atravesar cierto suelo, entre otros.

El estudio que conduce al diseño o aplicación a algún caso particular de los principios de la Geotecnia, debe seguir un proceso que involucra los tres grandes aspectos que se muestran en la **Figura 1.1**, cuya versión original fue denominada por Burland (1987) como *el Triángulo de la Mecánica de Suelos*, pero que bien puede ampliarse a toda la geotecnia. Ellos son y se explican como sigue:

- a) Perfil del subsuelo
- b) Comportamiento mecánico de los materiales (suelo, roca, materiales artificiales)
- c) Aplicación de la mecánica de suelos y rocas

Toda estructura física se cimienta sobre un terreno compuesto por suelo, roca y en ocasiones materiales artificiales, frecuentemente combinados con algún fluido -agua-, aire, gases. Por lo tanto, el primer aspecto de la **Figura 1.1** se refiere a establecer el tipo y distribución de los materiales que se encuentra por debajo de la superficie, su génesis y las condiciones del agua subterránea.

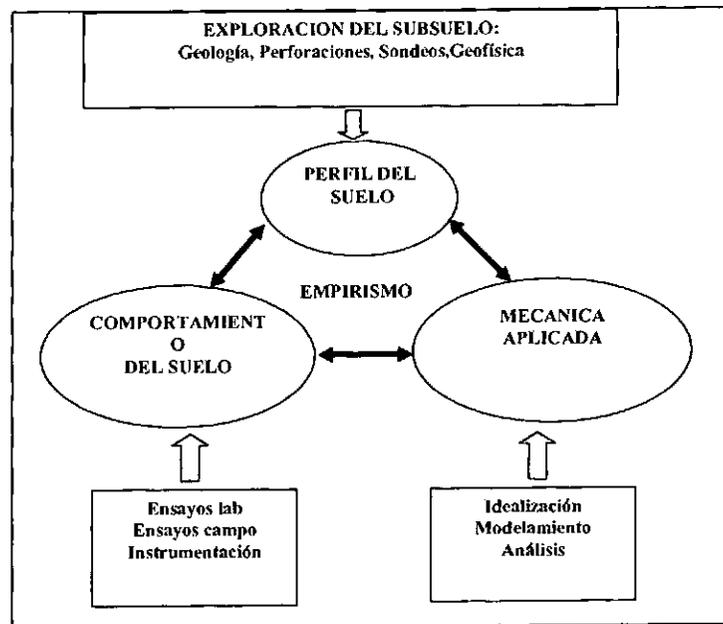


Figura 1.1. Aspectos geotécnicos básicos (Adaptado de Burland, 1987)

Este conocimiento es básico para los análisis posteriores, ya que siendo estos materiales geológicos el producto de la dinámica interna y externa de la tierra (o de la acción del hombre en el caso de materiales artificiales), su distribución y características suelen cambiar de sitio a sitio, aún en pocos metros de distancia. Sin embargo, aún con la mejor exploración de campo, es aventurado afirmar que se puede llegar a conocer completamente el tipo, distribución y características geomecánicas del material que yace bajo la superficie y siempre hay que resignarse a una aproximación de ellas, basada en las muestras que se obtengan de la exploración del subsuelo mediante perforaciones, apiques y trincheras, o de las inferencias a partir de ensayos in situ. Esta situación limita el conocimiento del subsuelo aún para el caso de un área relativamente pequeña como la que ocuparía una edificación, y obviamente la limitación es mucho mayor cuando se trata una gran área como es el caso de toda una ciudad. Por lo tanto, en una zonificación geotécnica como la que se propone para Cali, la representación de los tipos y distribución de los materiales que la subyacen será apenas una aproximación a las condiciones reales.

Por otra parte, a diferencia de los materiales artificiales como el concreto o el acero, en donde sus propiedades pueden diseñarse, las de los suelos y rocas están esencialmente determinadas por la naturaleza, aunque en ocasiones también son influenciadas por las eventuales acciones voluntarias o involuntarias del hombre. Por esta razón, para cada proyecto constructivo es necesario determinar las propiedades particulares de estos materiales geológicos mediante ensayos de laboratorio, ensayos de campo y la instrumentación del terreno; sobre esto trata el segundo aspecto mencionado. Así mismo, las propiedades a determinar dependerán no solo del tipo de material, sino también de las características del proyecto. De igual manera, el grado de aproximación a los valores reales de esas propiedades varía con la cantidad, calidad y pertinencia de la información que se obtenga de los ensayos. De esta manera, a menor información disponible mayor será el



grado de generalización, e inclusive se puede llegar al punto de no poder expresar numéricamente una propiedad más que en términos cualitativos. Por ejemplo, la resistencia de un suelo se podría expresar en términos como: suelo duro o suelo blando.

El tercer aspecto tiene que ver con la aplicación de los principios de la mecánica de sólidos y fluidos para el análisis y diseño de la estructura geotécnica de interés como puede ser el cimiento de una edificación o un talud de corte para una vía. Esto implica establecer la interacción suelo-estructura o roca-estructura mediante algún método de análisis. Para ello se debe realizar un modelamiento e idealización no solo de las condiciones de trabajo de la estructura sino del mismo material. Para el caso de zonificaciones geotécnicas, en donde el propósito no es el diseño de una estructura particular sino la delimitación de zonas homogéneas, estas idealizaciones son mucho mayores y por ello el resultado de estos trabajos no pueden emplearse para el diseño de estructuras sino como características indicativas de un comportamiento, válidas para una reglamentación general de diseño y construcción, o en el caso particular de este estudio para el modelamiento de la respuesta dinámica ante sismos.

Con base en lo dicho anteriormente, se podría decir que una zonificación geotécnica es la subdivisión de un territorio en áreas que aproximadamente tienen el mismo tipo y distribución espacial de materiales, cuyas propiedades de resistencia y deformación son similares y que por ende tendrían un comportamiento mecánico semejante ante un mismo tipo de sollicitación, como puede ser, por ejemplo, el peso de una edificación o un sismo. Por su parte, el proceso que conduce a este tipo de zonificaciones incluye un componente empírico y subjetivo, ya que como lo expresa Hernández (1996): "Subdividir un área geográfica en regiones con características similares es, a la vez, un arte y una ciencia provenientes de la taxonomía. Como arte requiere del ingenio y creatividad suficientes para escoger los factores más relevantes en el acto de clasificar y encontrar las relaciones ocultas entre estos factores, y como ciencia, debe establecer unos procedimientos claros, expeditos, matemáticos y repetibles, para hacer la síntesis de los factores y obtener unos resultados que sean una aproximación adecuada de la realidad".

## 1.1 OBJETIVO

De acuerdo con lo planteado, el objetivo general del trabajo es subdividir la Ciudad de Cali en regiones geotécnicas relativamente homogéneas en términos del tipo, distribución de materiales y propiedades índice, de resistencia y deformación que los distinguen, con el fin de ser empleadas para su posterior análisis de respuesta sísmica local.

## 1.2 ALCANCES Y LIMITACIONES

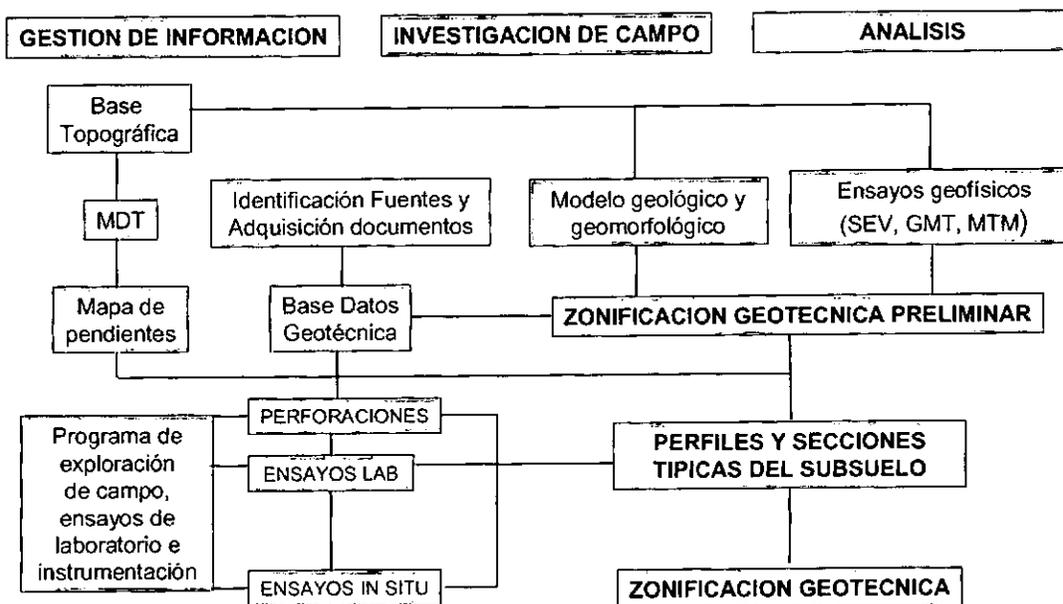
El alcance del estudio está estrechamente relacionado con el objetivo general propuesto por el Proyecto MZSCali, la escala de trabajo y las áreas de estudio, que corresponden a 121 Km<sup>2</sup> dentro del perímetro urbano, 18 Km<sup>2</sup> de áreas de futura expansión y 17.5 Km<sup>2</sup> de áreas de régimen diferido. Lo anterior implica una aproximación semi-detallada de los aspectos geotécnicos que caracterizan el subsuelo bajo la ciudad, la cual está limitada a la información disponible de estudios de suelos realizados en la ciudad (su distribución, cantidad y calidad de exploración), de la exploración del subsuelo realizada por el Proyecto (Geología, Geofísica, Geotecnia) y de los resultados de los ensayos de campo y laboratorio ejecutados. Por lo tanto, se enfatiza que en este caso, el principal propósito del mapa de zonificación

geotécnica es servir de modelo para los análisis de respuesta sísmica local y no reemplazará los estudios de suelos necesarios para cualquier obra que se adelante en la ciudad. No obstante, los resultados que se obtengan podrían emplearse como una herramienta indicativa de las condiciones geomecánicas generales del subsuelo o para las primeras fases de planeación de obras.

### 1.3 METODOLOGIA

Como método de trabajo se acoge una aproximación semi-empírica, en la cual como se dijo, la zonificación tiene un componente altamente empírico y subjetivo dado por el juicio de los especialistas para establecer el tipo de parámetros a considerar en ella, los rangos de variación de estos y el método de combinación de los mismos. Los valores cuantitativos, sin embargo, serán los obtenidos de estudios anteriores y de los resultados de la exploración de campo, los ensayos de laboratorio y la instrumentación que se realizó en el transcurso del estudio.

El proceso metodológico general que se ilustra en la **Figura 1.2** se compone de dos grandes actividades: la Zonificación Geotécnica Preliminar y la Zonificación Geotécnica Final. La primera es el resultado de la compilación y análisis de la información disponible y de una investigación general del subsuelo con base en métodos geofísicos indirectos. De esta manera, la investigación detallada podrá planificarse para que sea más eficiente y efectiva, en función de la información adicional y de los recursos que se requieran para la segunda.



**Figura 1.2.** Metodología General de Zonificación Geotécnica



Este informe está dividido en tres grandes temas. El primero es la recopilación y análisis de la información disponible proveniente básicamente de estudios de suelos realizados por diversas firmas consultoras en la ciudad. El segundo es la exploración del subsuelo realizada por el Proyecto MZSCali, utilizando para ello métodos directos (exploración con equipos mecánicos) e indirectos (piezocono sísmico y métodos geofísicos). El tercero es el proceso detallado empleado para la obtención del mapa de zonificación geotécnica.

Con la recopilación y análisis de estudios de suelos es posible tener una concepción general inicial de las características de los suelos con la cual identificar vacíos de información y planificar nuevas exploraciones. Igualmente, cuando la información disponible es compilada y organizada apropiadamente, se convierte en un valioso complemento para la determinación y caracterización de unidades geotécnicas. Llegar a la organización de datos en una base adecuada, sin embargo, requiere un gran esfuerzo organizativo que parte desde la identificación de fuentes hasta el análisis de los datos. Por su parte, la exploración del subsuelo implica un mayor recurso económico y de tiempo, lo cual obliga a un cuidadoso análisis de la información disponible y el concurso de expertos conocedores de la zona para planificar la distribución y profundidad de esa exploración. En este informe se describen en detalle ambas actividades y los resultados encontrados para la ciudad de Cali.



## CAPITULO 2

### BASE DE DATOS GEOTECNICA DE LA CIUDAD DE CALI

#### 2.1 IMPLEMENTACIÓN Y ALIMENTACIÓN

##### 2.1.1 Compilación de la información disponible

Para llevar a cabo esta actividad, se acudió a todas las posibles fuentes de información tales como las compañías de ingenieros consultores, entidades públicas y privadas de la ciudad que elaboraran o dispusieran de estudios de suelos. Como resultado de esta investigación se contactaron a 32 fuentes. Paso seguido se realizó un primer acercamiento con cada una de ellas para identificar su información, con el fin de clasificar a cada una según el tipo, cantidad y accesibilidad de la misma. De esta manera se establecieron las fuentes que se muestran en la **Tabla 2.1**.

**Tabla 2.1.** Fuentes de información para la alimentación de la BDG.

No.	Nombre de la Fuente de Información	Código
1	CESCO LTDA	CSC
2	GLORIA INÉS ROSALES FLORES	GIR
3	GRUPO CONSULTOR DE INGENIERIA GCI LTDA	GCI
4	ESTUDIO DE SUELOS LTDA	ESL
5	CARLOS H PARRA & ASOCIADOS	CPS
6	GABRIELA RAMÍREZ QUINTERO	GRV
7	VILLAFAÑE Y ASOCIADOS LTDA	VAL
8	SAYA LTDA	SAY

##### 2.1.2 Estructuración de la Base de Datos Geotécnica BDG

A partir de los estudios de suelos típicos que han realizado las firmas consultoras en la ciudad de Cali, se diseñó la BDG con cinco entidades como se muestra a continuación en el Diagrama Entidad – Relación en la **Figura 2.1**. Como se puede observar las relaciones existentes entre cada entidad son del tipo uno a varios ( $1 - \infty$ ), es decir, que un estudio puede tener varias exploraciones y a su vez una exploración presenta varios estratos y muestras.

La BDG fue elaborada en Excel debido a la eficiencia en la captura de datos, contando además con las herramientas necesarias para hacer el posterior análisis estadístico y crear tablas de intercambio con la plataforma SIG. En el Anexo 1 se presentan las propiedades de cada entidad y sus correspondientes atributos que la definen.

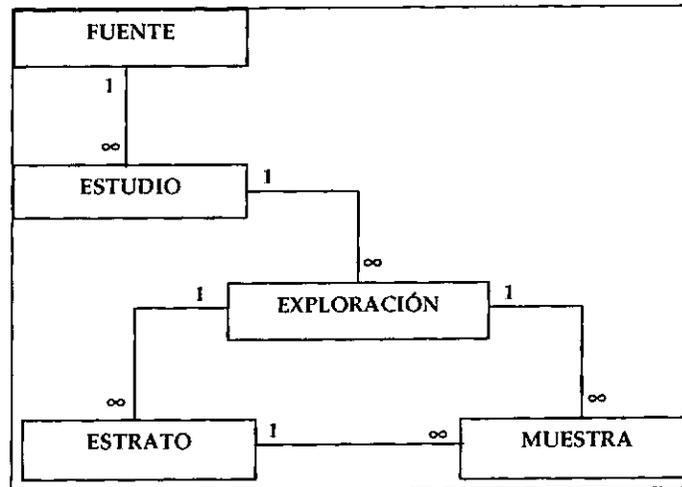


Figura 2.1. Diagrama Entidad – Relación de la BDG

### 2.1.3 Alimentación de la BDG

De acuerdo con las condiciones establecidas por las fuentes de información, se planteó una estrategia para optimizar los recursos, que consistió en incorporar la mayor cantidad de información consignada en los estudios de suelos. Cuando un estudio lo ameritaba, en lo posible, se procedió a tomar fotocopia a la parte del estudio que fuese de interés (archivo análogo del proyecto) con el fin de tener material de trabajo y de consulta rápidamente.

Paralelo al proceso de alimentación de la BDG, cada estudio se localizó en la base cartográfica a Escala 1:10.000 (Fuente: Planeación Municipal-CVC) articulada por el Proyecto MZSCali. Para ello se digitalizaron las localizaciones de cada estudio o punto de exploración con la aplicación AcrGIS, con lo cual se obtuvieron las respectivas coordenadas planas georreferenciadas con origen Pacífico (ver informe No.6.2, Subproyecto de Cartografía, Proyecto MZSCali, 2005).

### 2.1.4 Corrección de la BDG

A esta etapa se le prestó mucho cuidado, ya que aunque se dispuso de la información en una base de datos, alguna de ella no se encontraba de la forma más apropiada para los posteriores análisis. Por ello, una vez ingresados los datos a la base, se procedió a buscar los errores de consistencia, codificación y ortografía con la ayuda de filtros y funciones de búsqueda y referencia. Finalmente, se paso por una etapa de homologación de palabras, que consiste, por ejemplo, en dejar siempre de la misma forma un nombre de un barrio, un tipo de suelo o una característica específica.

### 2.1.5 Resultados

La BDG se alimentó desde el día 8 de septiembre hasta el 12 de diciembre de 2003 y desde el 7 de junio al 6 de julio de 2004. En los primeros tres meses se incorporaron a la BDG 941 estudios y en el último mes se ingresaron 221 estudios más, para un total de 1162 estudios



de suelos realizados en la ciudad de Cali. La **Tabla 2.2** y la **Figura 2.2** ilustran la cantidad de información incorporada.

Algunos indicadores de la cantidad y distribución de la información tanto en profundidad como en área se muestran en las **Tablas 2.3 y 2.4**, junto con el cálculo de la densidad de estudios de suelos por kilómetro cuadrado para cada comuna de la ciudad. Además, en la **Figura 2.3** se muestra el histograma de la profundidad de las 4860 exploraciones de la BDG. De esta figura es evidente que la mayoría de los estudios se encuentran entre los 4 y los 10 metros de profundidad, siendo la exploración típica de 6 a 8 metros.

La localización de los Estudios de Suelos ingresados a la BDG se presentan en la **Figura 2.4**, donde se puede apreciar una buena distribución de la información en toda la ciudad, aunque con algunos vacíos en ciertas zonas. El archivo análogo de la BDG cuenta con 364 estudios procesados y organizados en 18 folders. En dicho archivo se encuentran consignados los registros estratigráficos y resultados de laboratorio de los estudios de suelos más importantes de la ciudad.

La alimentación de la BDG se realizó con la participación de estudiantes de X Semestre de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, liderados por el Profesor Germán Villafañe, quién participó además en las labores de corrección de datos de la BDG.

## 2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

### 2.2.1 Clasificación de muestras por USCS-ASTM D 2487-98

Fue necesario reclasificar las muestras por dos razones: una para analizar la calidad de las clasificaciones, y otra para homologar los diferentes tipos de clasificación utilizados por las fuentes consultadas.

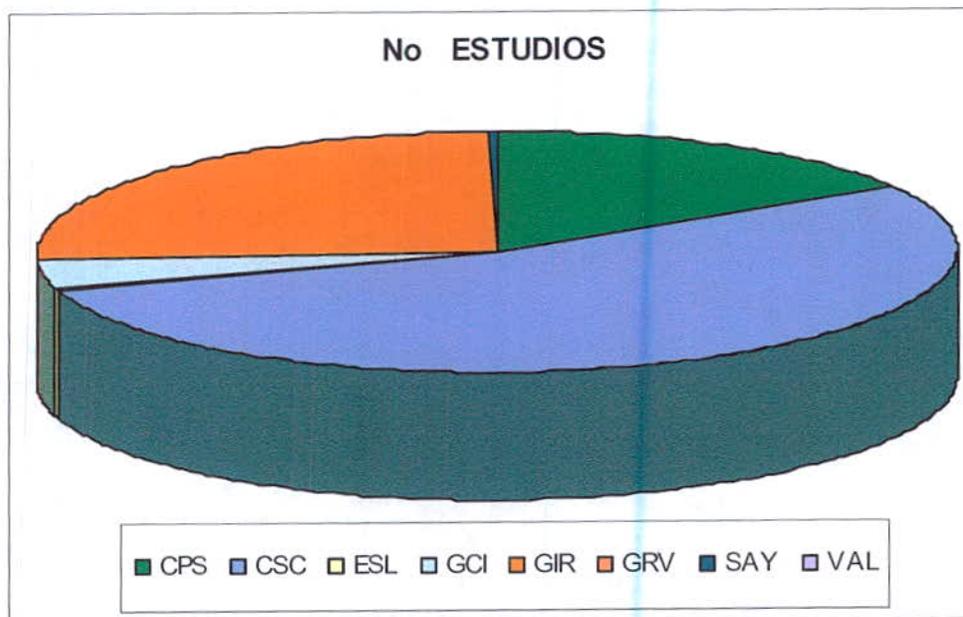
Se encontró que para un total de 28228 muestras de suelo ingresadas a la BDG, 28042 pertenecía a exploraciones directas (99%) de las cuales se podían clasificar 24421 muestras (87%) ya que contaban con los ensayos de clasificación. Finalmente, al clasificar de nuevo las muestras se observó que 17585 muestras (72%) estaban clasificadas de igual manera.

Directamente se logró clasificar el 87% de las muestras por tener los ensayos que sustentaban su clasificación. Al porcentaje restante de las muestras se le adaptó la clasificación suministrada por el estudio de suelos, colocándole un asterisco (\*) al final. De esta manera, se calibraron 2515 muestras más (10%) completando así un 97% de muestras clasificadas.

Los estratos se calibraron de manera similar, partiendo de los ensayos de laboratorio. Como resultado de este proceso se logró calibrar 13983 (68%) estratos con muestras revisadas y 1626 (8%) fueron asumidos según criterios preestablecidos, de los 20454 datos reportados sujetos a verificación. Los 4845 (24%) datos faltantes corresponden a estratos identificados como capa vegetal y rellenos (ver informe No.2.3, Subproyecto de Geología, Proyecto MZSCali, 2005), en cuyo caso habitualmente no se clasifica por la USCS, sin embargo, para efectos de determinar materiales tipo estos estratos se han clasificado con las letras CV y R respectivamente.

**Tabla 2.2.** Cantidad de información ingresada a la BDG

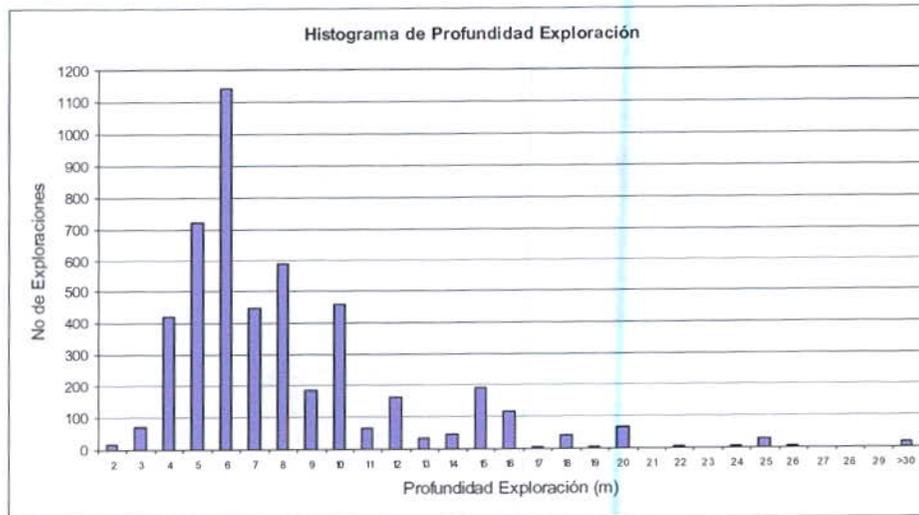
EMPRESA	No. ESTUDIOS	No. EXPLORACIONES	METROS EXPLORADOS	No. ESTRATOS	No. MUESTRAS
CPS	191	819	6674.4	3399	5279
CSC	624	2756	22957.1	11646	14558
ESL	6	16	192.3	66	83
GCI	40	250	1406.1	877	2165
GIR	297	978	6974.9	4359	5675
GRV	2	27	263.2	148	275
SAY	1	12	295.1	131	177
VAL	1	2	26	20	16
<b>TOTAL</b>	<b>1162</b>	<b>4860</b>	<b>38789.1</b>	<b>20646</b>	<b>28228</b>



**Figura 2.2.** Distribución de Estudios de Suelos por firma consultora

**Tabla 2.3.** Características generales sobre la exploración y muestreo en los estudios de suelos

EMPRESA	PROFUNDIDAD PROMEDIO	EXPLORACIONES POR ESTUDIO	MUESTRAS POR ESTUDIO	MUESTRAS POR EXPLORACIÓN	MUESTRAS POR METRO
CPS	8.15	4.29	27.64	6.45	0.79
CSC	8.33	4.42	23.33	5.28	0.63
ESL	12.02	2.67	13.83	5.19	0.43
GCI	5.62	6.25	54.13	8.66	1.54
GIR	7.13	3.29	19.11	5.80	0.81
GRV	9.75	13.50	137.50	10.19	1.04
SAY	24.59	12.00	177.00	14.75	0.60
VAL	13.00	2.00	16.00	8.00	0.62
<b>TOTAL</b>	<b>7.98</b>	<b>4.18</b>	<b>24.29</b>	<b>5.81</b>	<b>0.73</b>



**Figura 2.3.** Histograma de profundidad de exploraciones



748

**Tabla 2.4.** Densidad de información por Km<sup>2</sup>

COMUNA	AREA (Km <sup>2</sup> )	ESTUDIOS	ESTUDIOS POR KM <sup>2</sup>
1	3.911	17	4.35
2	11.313	221	19.53
3	3.704	72	19.44
4	4.522	39	8.62
5	4.198	33	7.86
6	5.015	42	8.38
7	5.086	27	5.31
8	5.267	41	7.78
9	2.899	24	8.28
10	4.298	50	11.63
11	3.700	18	4.87
12	2.329	12	5.15
13	4.752	19	4.00
14	4.523	24	5.31
15	4.080	21	5.15
16	4.276	36	8.42
17	23.150	217	9.37
18	5.436	30	5.52
19	11.285	163	14.44
20	2.439	11	4.51
21	4.829	26	5.38
<b>SUBTOTAL</b>	<b>121.013</b>	<b>1143</b>	<b>9.45</b>
AE (0)		19	
<b>TOTAL</b>		<b>1162</b>	

AE: Área de Expansión

### 2.2.2 Materiales de análisis

Para poder establecer de forma adecuada los perfiles típicos, es conveniente identificar las diferentes clases de materiales existentes en el área de estudio, para luego agruparlos y simplificar el análisis. Entonces, con base en la clasificación unificada de suelos se agruparon los materiales de tres formas como se ilustra en la **Tabla 2.5** (las letras mayúsculas entre paréntesis corresponden a la designación usada en la BDG).

Como se observa, los materiales tipo 1 y 2 agrupan parcialmente los suelos finos, mientras que los materiales tipo 3 reúnen a todos los finos, limos y arcillas. Esto es con el fin de establecer los perfiles típicos como una secuencia de materiales tipo, de modo que entre más tipos de materiales, mayor será el número de perfiles típicos posibles. Por esta razón, los análisis preliminares se trabajaron con la tercera clasificación. Posteriormente las otras clasificaciones se usaran para determinar zonas específicas y mejorar el conocimiento general.

Tabla 2.5. Clasificación de los Materiales

Clasificación o símbolo	Materiales Tipo 1	Materiales Tipo 2	Materiales Tipo 3
MH, CH	Fino de alta plasticidad (H)		
ML, CL, ML CL	Fino de baja Plasticidad (L)		
MH, ML, ML-CL		Limo (M)	
CH, CL		Arcilla (C)	
MH, ML, ML-CL, CH, CL			Finos (F)
OL, OH	Orgánico (O)	Orgánico (O)	Orgánico (O)
SC, SM, SP, SW, SW SM, SW SC, SP SM, SP SC Y SC SM	Arena (S)	Arena (S)	Arena (S)
GC, GM, GP, GW, GW GM, GW GC, GP GM, GP GC Y GC GM	Grava (G)	Grava (G)	Grava (G)
R	Relleno (R)	Relleno (R)	Relleno (R)
CV	Capa Vegetal (V)	Vegetal (V)	Vegetal (V)
RO	Roca (K)	Roca (K)	Roca (K)

Las principales propiedades de los estratos de los materiales tipo se ilustran en la **Tabla 2.6**, donde se observa claramente una tendencia en cuanto al orden de disposición de los materiales, así: rellenos y/o capas vegetales hasta una profundidad promedio de 0.8 m, subyaciendo a estos le siguen estratos de suelos finos hasta una profundidad promedio de 5 m, y por debajo de esta profundidad se encuentran estratos granulares de arenas y/o gravas, hasta la profundidad promedio de exploración de 8 m.

### 2.2.3 Mapas de Materiales Tipo

Según lo explicado en el numeral anterior, los depósitos superficiales de la ciudad de Cali se caracterizaron en tres grupos de suelos: Finos (F), Arenas (S) y Gravas (G). Con esta clasificación se elaboraron coberturas para cada grupo, para observar su distribución tanto en área como en profundidad. Para ello se utilizaron las coordenadas de cada exploración y la profundidad desde donde comienza el estrato, estableciendo como convención cartográfica circunferencias de varios tamaños para cada punto, de manera que las de menor tamaño

significaran que el estrato comienza más superficialmente y las circunferencias mayores corresponderán a estratos que comienzan más profundo.

**Tabla 2.6.** Estadísticas generales de los estratos de los Materiales Tipo

MATERIAL	H	L	M	C	F	S	G	K	O	R	V
No de Estratos	10883	1789	8510	4162	12672	1403	1062	71	16	3511	1717
Espesor Promedio (m)	2.1	1.9	2.3	1.8	2.1	2.6	3.1	2.4	0.9	0.8	0.6
Espesor Máx (m)	20.5	19.3	19.3	20.5	20.5	17.5	26.4	11.4	1.6	7.0	2.3
Espesor Min (m)	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.1	0.1
Promedio de Tramo desde donde comienza el estrato (m)	2.8	3.2	3.0	2.6	2.8	4.8	4.7	3.4	2.9	0.1	0.2
Promedio de Tramo hasta donde termina el estrato (m)	4.9	5.1	5.2	4.3	5.0	7.5	7.8	5.8	3.8	0.9	0.7

En la **Figura 2.5** se presenta la distribución de los estratos arcillo limosos o limo arcillosos, en donde se observa que la mayoría de los estratos finos comienzan superficialmente entre 0 y 1 m hasta el rango 5 a 10 m en toda el área de estudio, exceptuando zonas como el sector de Pance y Navarro. El hecho que en un sitio se presenten todas las posibles circunferencias que se ilustran en la leyenda, quiere decir que existe una secuencia de materiales finos, posiblemente con intercalaciones de estratos arenosos y/o gravosos. En general, se puede inferir que superficialmente (del orden de 15 m) la tendencia de la distribución de los materiales finos es de mayor espesor y densidad en la zona de abanicos aluviales y de menor densidad y espesor en la llanura aluvial junto con el sector de Pance.

La distribución de los estratos arenosos mostrados en la **Figura 2.6** es menos densa que la de los materiales finos, con una marcada tendencia a aumentar su densidad en la llanura aluvial y en cercanía de los drenajes de los abanicos aluviales. De la observación del tamaño de las circunferencias se puede concluir que los estratos arenosos en su mayoría comienzan a profundidades mayores a 5 m y se intercalan muy posiblemente con estratos finos y/o gravosos.

A diferencia de las dos anteriores figuras, la distribución de los estratos gravosos ilustrados en la **Figura 2.7** es mas concentrada en ciertos sectores, principalmente en el abanico del río Cali, donde se presenta la mayor concentración de estratos gravosos que van desde la superficie hasta las máximas profundidades exploradas. Algunas zonas con gravas a profundidades mayores a 10 m se encuentran en los abanicos de los ríos Cañaveralejo, Meléndez y Lili. En el sector de Pance, aunque se dispone de poca información, es claro que los estratos gravosos afloran superficialmente, mientras que hacia la llanura aluvial se encuentran unos pocos lugares que corresponden a exploraciones mayores a 15 m, en las que se detectó la presencia de gravas finas.

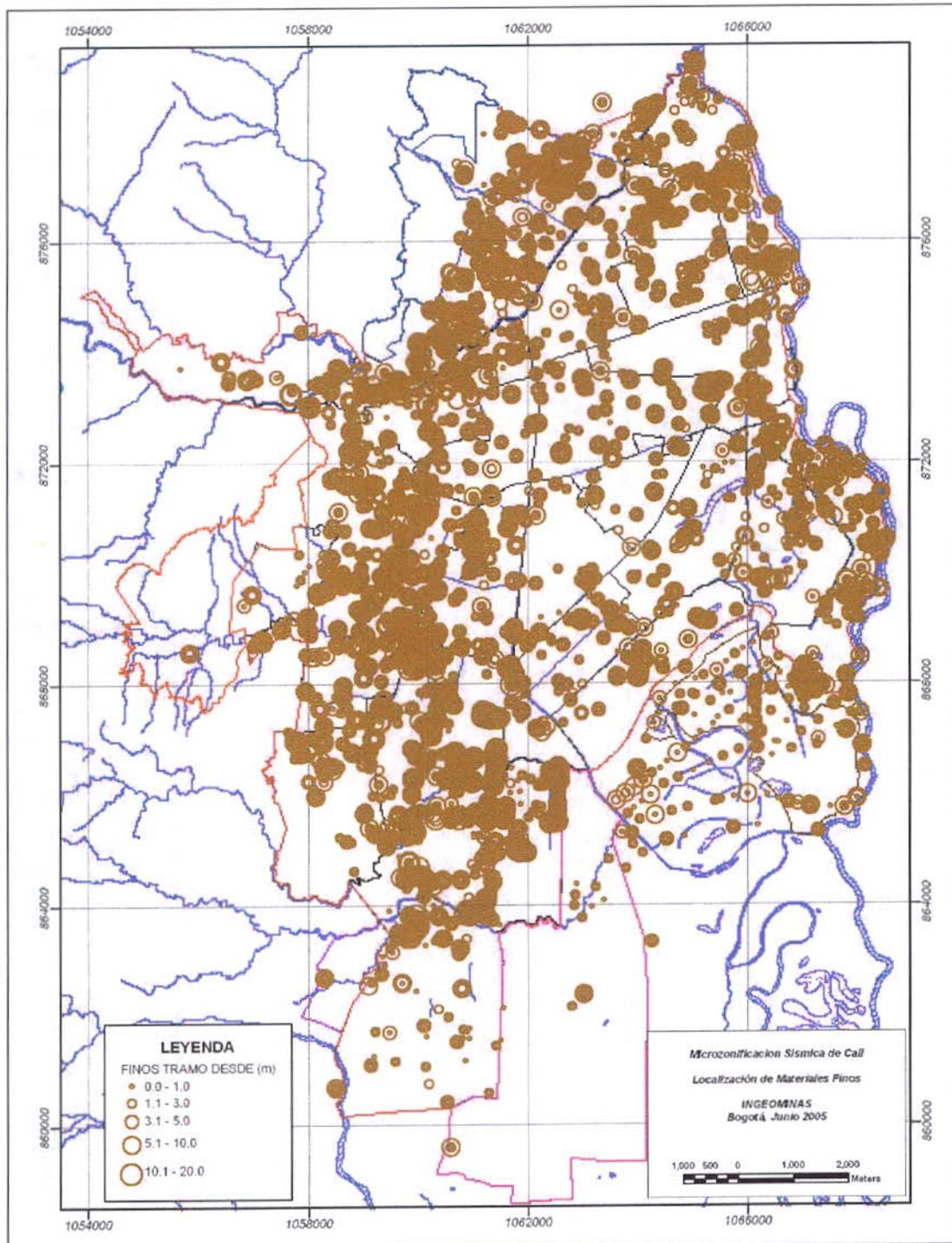


Figura 2.5. Distribución de estratos superficiales de materiales Finos (Arcillas y Limos)

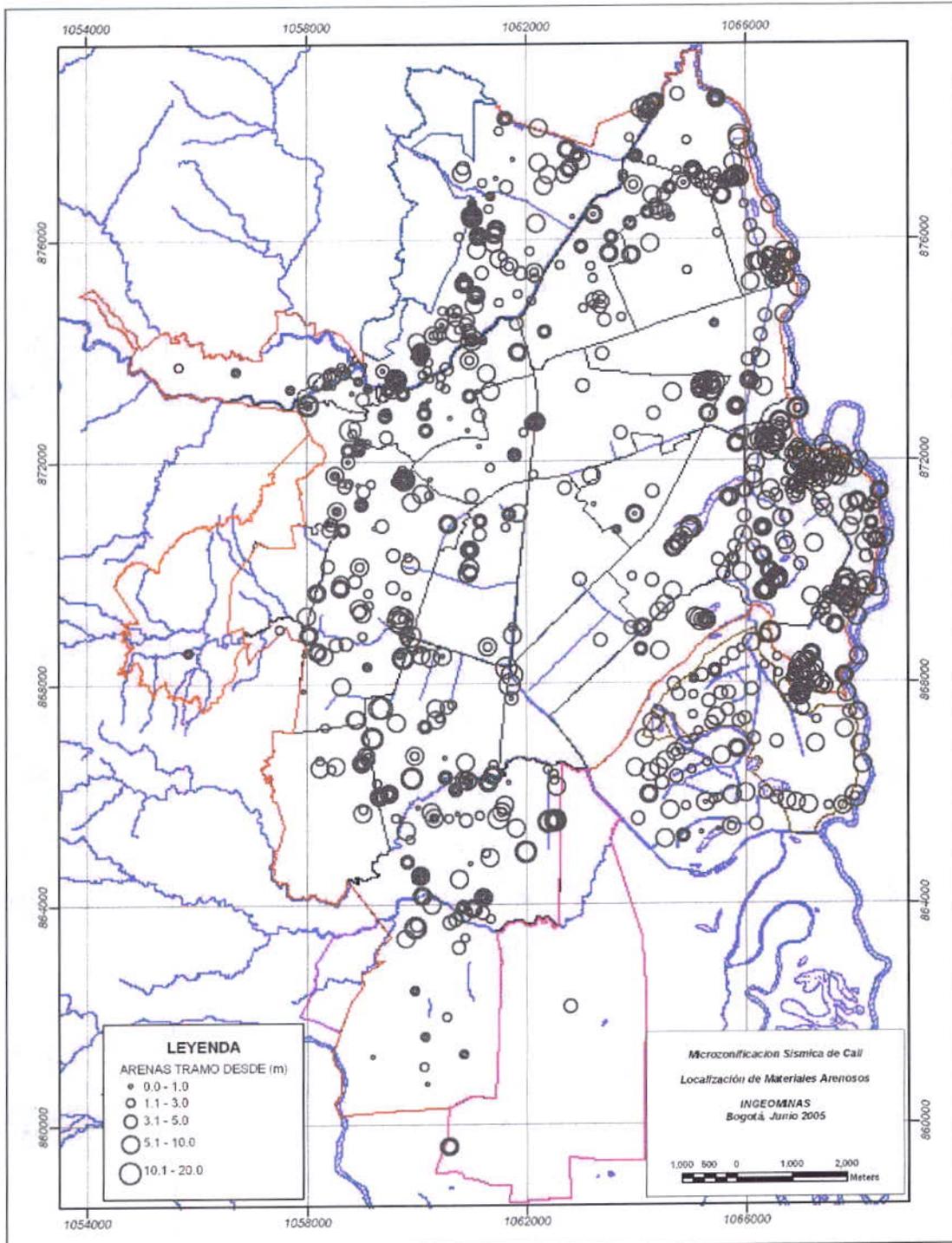


Figura 2.6. Distribución de estratos superficiales de materiales Arenosos.

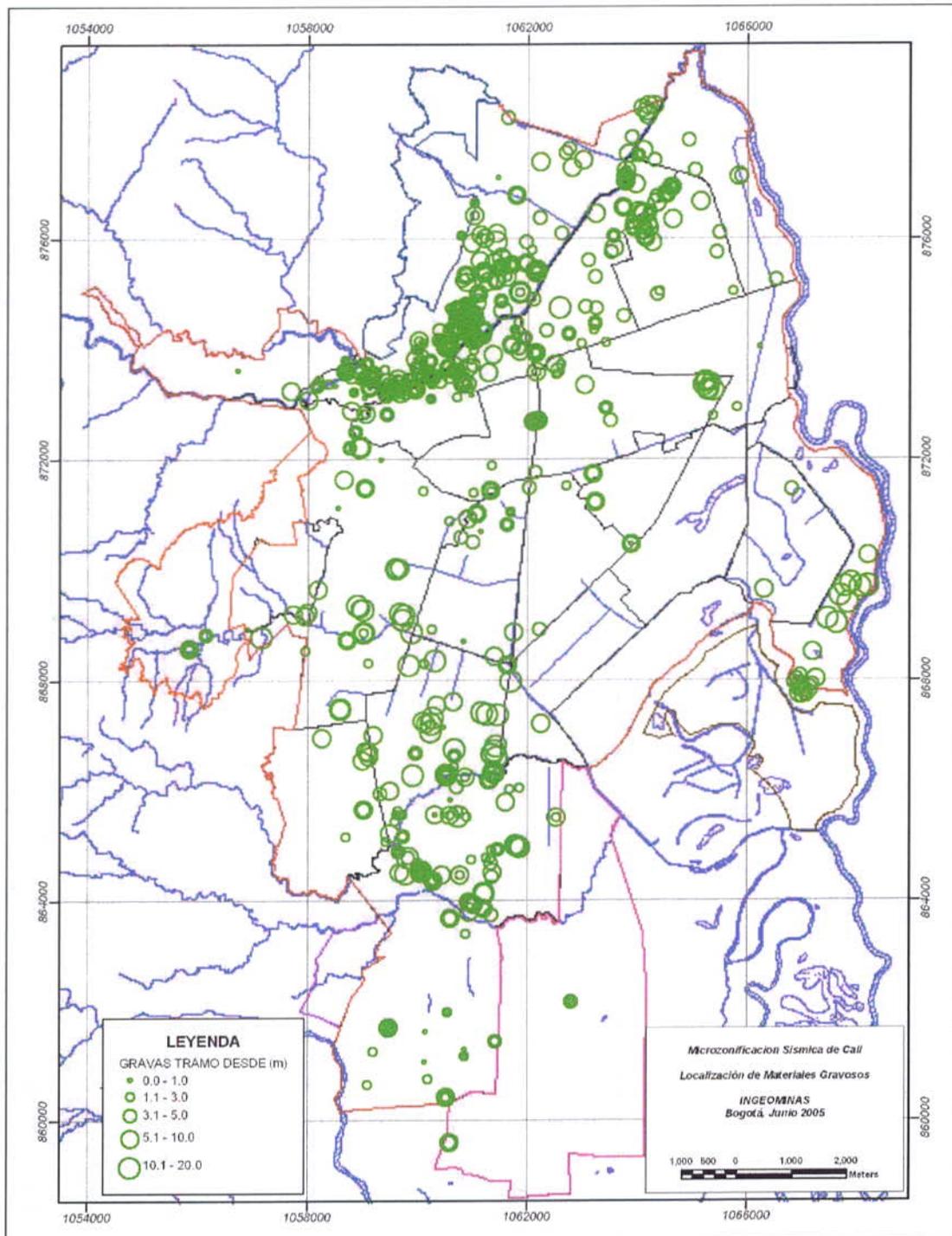


Figura 2.7. Distribución de estratos superficiales de materiales Gravosos.



Los demás materiales: Orgánico (O), Roca (K) y Capas Vegetales (V) no se tuvieron en cuenta para los mapas de materiales, puesto que las capas orgánicas y contactos de roca fueron pocos. El estrato de capa vegetal es común en la mayoría de los estudios y se presenta a nivel superficial, motivo por el cual no se incluyeron en los análisis.

#### 2.2.4 Estadísticas por Materiales Tipo

Una caracterización general de cada uno de los tres tipos de materiales (Finos, Arenas y Gravas) se puede observar en las Figuras 2.8 a 2.10, en donde se ilustran las distribuciones de frecuencia de la variación de la composición de estos grupos, las propiedades índice y de resistencia de las muestras. De acuerdo con ellas, cada material posee las siguientes características:

**Materiales tipo Finos.** La composición de los materiales finos está dada principalmente por MH y CH con más de 5000 datos, en segunda proporción están los ML y CL con aproximadamente 1000 datos y con menos de 100 datos las CL ML. Las humedades naturales están en un rango entre 2 y 135%, pero es claro que el verdadero rango está entre 20 y 60 %, debido a que los extremos reportados seguramente son datos incorrectos, la humedad representativa está cerca del 40%. El límite líquido presenta una distribución normal, entre 30 y 120% con valores promedio de 70%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 20 y 60% con valores representativos entre 30 y 35%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 80% con un valor promedio de 30%. Los índices de liquidez tienen un amplio rango, lo cual amerita una revisión de dichos valores extremos, pero la mayoría de los datos están entre el -1.0 y 1.0, sesgados a los valores positivos representativos entre 0 y 0.3, es decir que las humedades naturales son muy próximas al límite plástico, lo que permite inferir que los materiales se encuentran en su mayoría sobre-consolidados. Los pesos unitarios totales y secos poseen distribuciones normales con valores representativos de 1.85 y 1.3 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente, hay una anomalía en la distribución del peso unitario seco en el valor de 1.1 gr/cm<sup>3</sup> la cual se debe analizar por separado. Los valores de resistencia a la compresión simple sin ningún proceso de calibración por profundidad y saturación de la muestra, tiene una distribución sesgada a la izquierda con un pico representativo en 1.6 kg/cm<sup>2</sup> y un valor promedio de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT sin ser calibrados, poseen una distribución asimétrica a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 20 golpes/pie. Estos dos últimos parámetros de resistencia se deben calibrar a la hora de realizar los análisis detallados (para este tipo de material se debe tomar como un índice de resistencia, pero en ningún momento utilizar para obtener parámetros de resistencia a partir de correlaciones).

**Materiales tipo Arenosos.** Los materiales arenosos se componen principalmente por arenas SM y SC con más de 500 datos, en segunda proporción están las arenas con mezclas menores de materiales finos con menos de 100 datos. Las humedades naturales están en un rango entre 2 y 100%, pero es claro que el verdadero rango está entre 5 y 50 %, los extremos reportados seguramente son datos que se deben revisar cuidadosamente, la humedad mas representativa está cerca del 20%. El límite líquido presenta una distribución normal un poco sesgada a la izquierda entre 20 y 80% con valores promedio de 42%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 10 y 50% con valores representativos entre 30 y 35% para las arenas con finos plásticos, se observa que cerca de 700 muestras pertenecen a arenas con finos no plásticos. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la



izquierda entre 5 y 40% con un valor promedio del 15%. El porcentaje de finos presenta una tendencia uniforme desde el 10% con un pequeño pico en el 25% lo cual indica que la mayoría de las muestras son arenas con altos contenidos de finos. Los pesos unitarios totales y secos de este tipo de muestras son poco representativos (27 muestras) y poseen distribuciones erráticas con valores promedio de 1.9 y 1.5 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple son pocos y al igual que los pesos unitarios son poco representativos, en cambio se cuenta con mas de 2400 muestras con valores de N del SPT que poseen una distribución simétrica entre 5 y 45 golpes/pie con un valor pico de 25 golpes/pie y posee una moda de 50 golpes/pie con mas de 600 datos. Este último parámetro de resistencia se debe calibrar al momento de realizar los análisis de licuación.

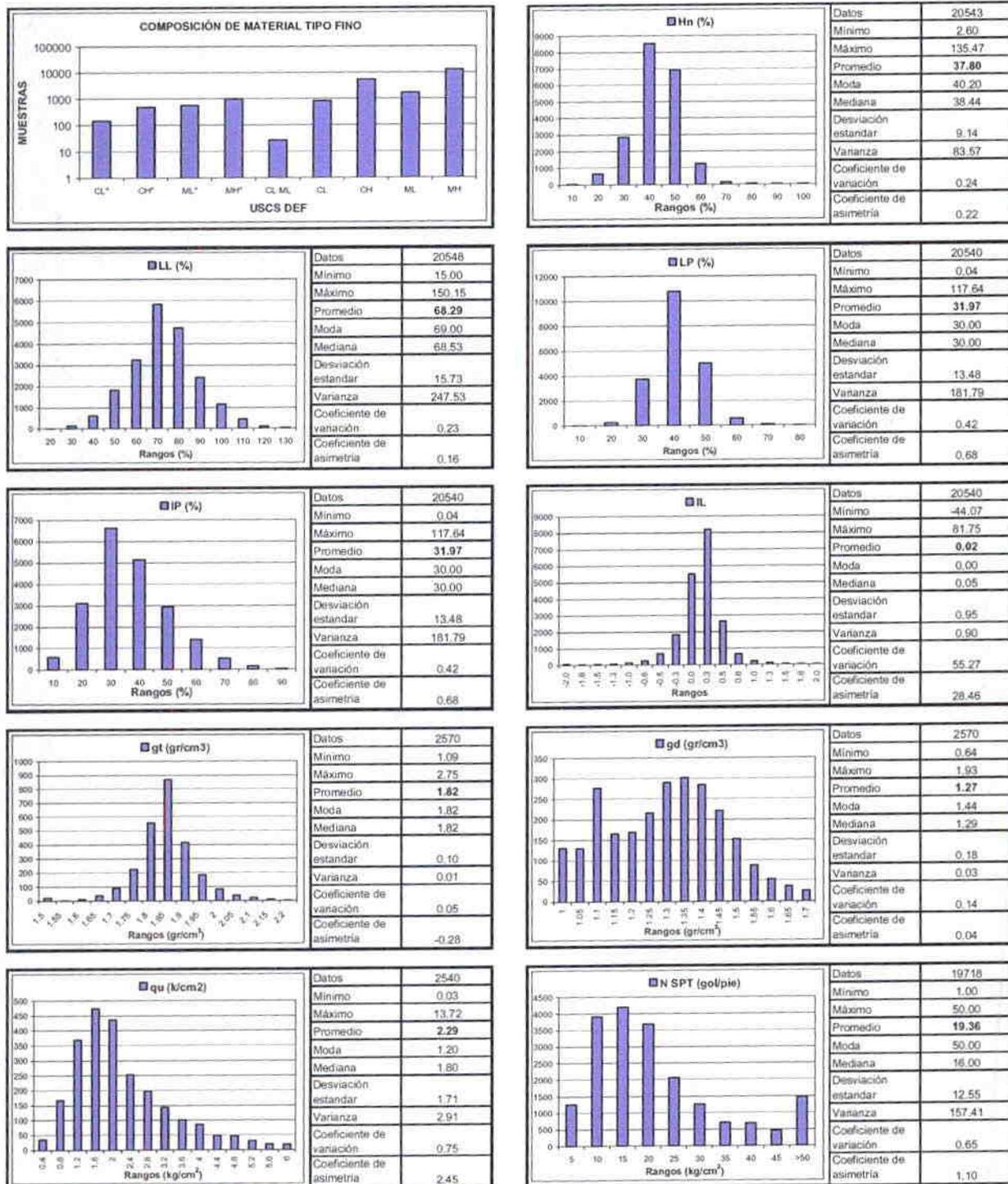
**Materiales tipo Gravosos.** Los materiales gravosos se componen principalmente por gravas GM y GC con más de 100 datos, en segunda proporción están las gravas con mezclas menores de materiales arenosos y finos con menos de 100 datos. Las humedades naturales están en un rango entre 5 y 50%, con un valor representativo del 15%. El límite líquido de la matriz presenta una distribución normal un poco sesgada a la izquierda entre 20 y 80% con valores promedio de 47%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 10 y 50% con valores representativos entre 30 y 35% para las gravas con finos plásticos, se observa que cerca de 250 muestras pertenecen a gravas con finos no plásticos y límites plásticos menores a 5%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 5 y 45% con un valor promedio de 17%. Los índices de liquidez tienen un amplio rango, pero la mayoría de los datos están entre -2.0 y 1.0, sesgados a los valores negativos con valores representativos de -0.5, es decir que las humedades naturales son menores al límite plástico, lo que infiere que el material se encuentra en su mayoría muy sobre-consolidado, pero hay que ser cuidadosos con este parámetro, porque es posible que la humedad natural corresponde al conjunto grava-matriz y los límites corresponden únicamente la matriz, por ello se presentan estos valores en el índice de liquidez. Los porcentajes de grava, arena y finos presentan tendencias normales y un poco asimétrica para los finos, y en promedio las mezclas predominan con valores promedio de 50, 30 y 20% de grava, arena y finos respectivamente, mostrando el predominio de las mezclas en los materiales gravosos. Los valores de resistencia a la penetración estándar N poseen una distribución uniforme entre 5 y 45 golpes/pie con un valor promedio de 35 golpes/pie y posee una moda de 50 golpes/pie con más de 500 datos. Este último parámetro de resistencia se debe calibrar a la hora de realizar los análisis detallados.

### 2.2.5 Mapa de Perfiles Geotécnicos Típicos Superficiales

Luego de creados los perfiles para cada lugar, fue necesario agruparlos en perfiles tipo, puesto que con el anterior proceso resultaron 51 clases de perfiles, como se muestra en la **Tabla 2.7**. Así, con base en las secuencias observadas se agruparon en siete perfiles tipo como se muestran en la **Tabla 2.7**.

El perfil PT 0 corresponde a perfiles de estratos finos de menos de 5 m de profundidad, y como se ha mostrado en el desarrollo de este informe, es muy probable que este perfil este suprayaciendo a un estrato diferente. En el perfil PT 1 se encuentran los perfiles de estratos finos de mas de 5 m de profundidad, en el PT 2 se agruparon las secuencias de material fino con grava principalmente, en el PT 3 están las secuencias de finos, gravas y arenas, en el PT 4 se agruparon los estratos seguidos de finos, arenas y gravas, en el PT 5 se encuentra las secuencias de materiales finos suprayaciendo materiales arenosos y en el PT 6 están los

perfiles que hicieron contacto con la roca a profundidades menores de 10 m. La localización de cada uno de estos perfiles se muestra en el **Figura 2.11**.



**Figura 2.8.** Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Finos

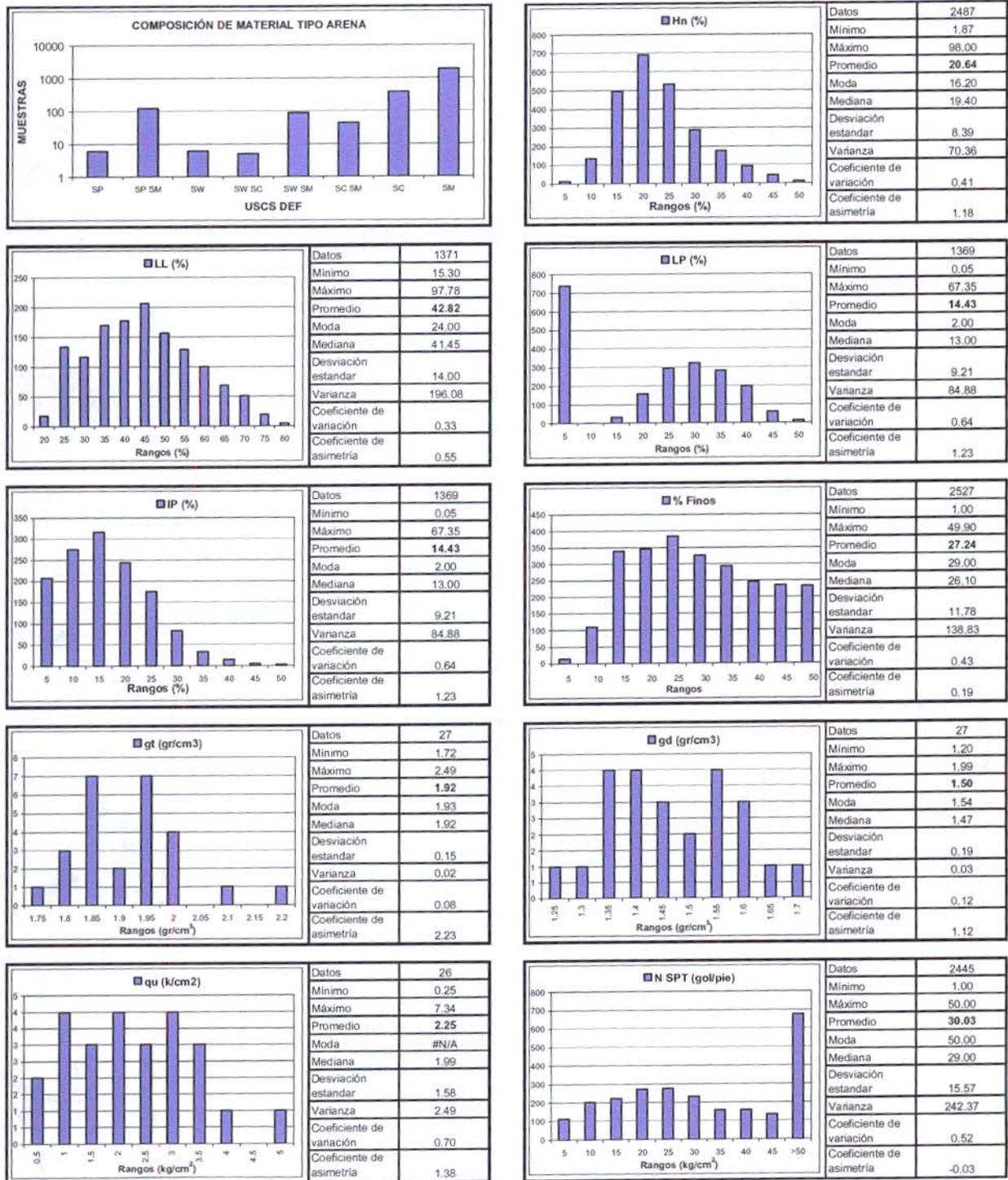


Figura 2.9. Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Arenas

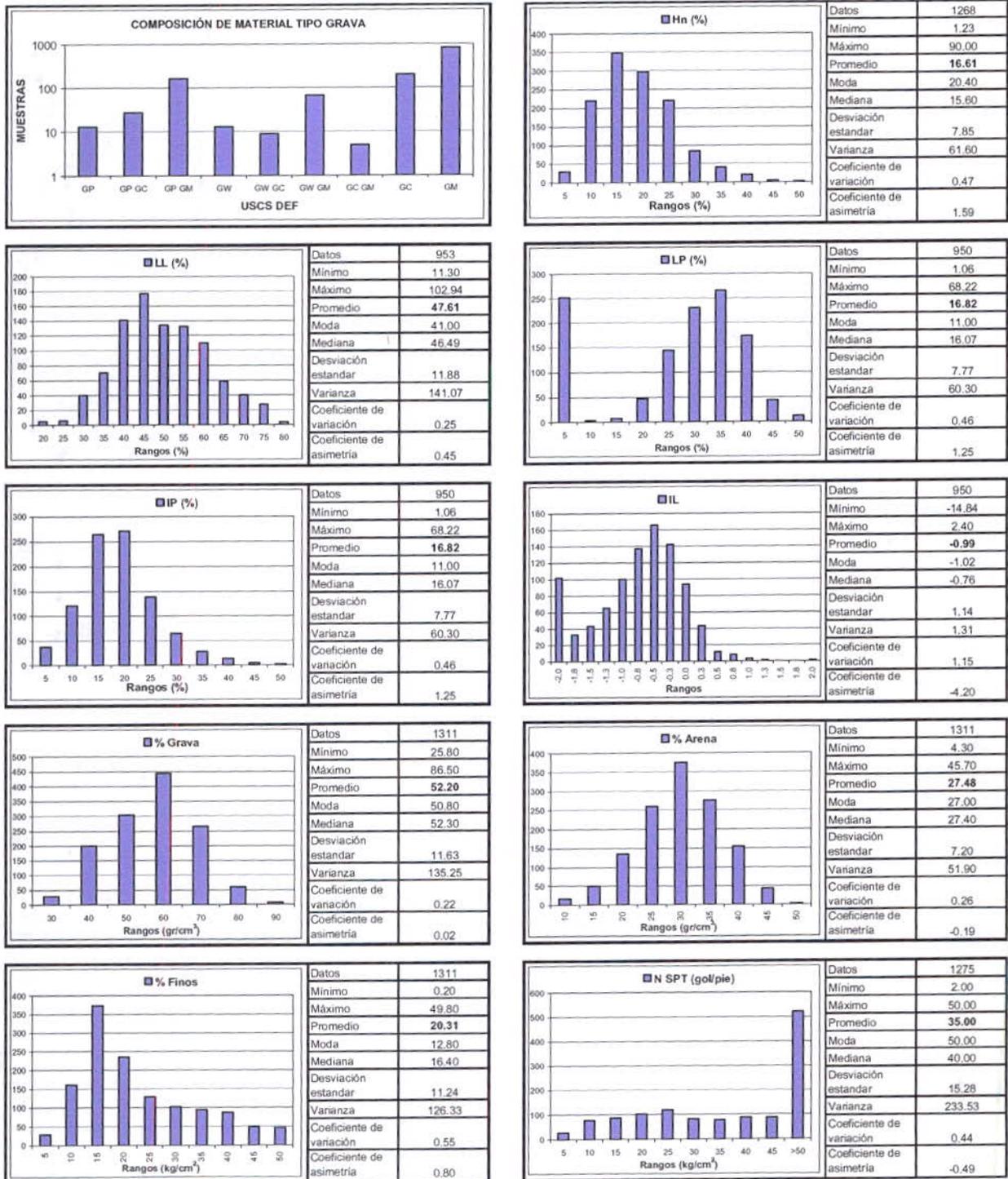


Figura 2.10. Estadísticas de las muestras de los Materiales Tipo Gravas



759

De la distribución de los perfiles (**Figura 2.11**) es clara la existencia de dos grandes zonas geotécnicas acordes a la geología superficial: abanicos aluviales y llanura aluvial. En primer lugar, encontramos la zona de abanicos aluviales conformados en su mayoría por perfiles tipo 1 y 2 que son los más numerosos, y en menor cantidad perfiles 3, 4 y 5. Los perfiles tipo 2 se encuentran en las cercanías de los drenajes principales, y los perfiles tipo 1 están distribuidos uniformemente en todo el abanico, seguramente bajo los perfiles tipo 1 se hallaran estratos gravosos, convirtiéndolos en tipo 2, los perfiles tipo 3 y 4 son pocos y dispersos pero en su mayoría se encuentran en medio de perfiles tipo 2, lo que implica que seguramente sean del mismo tipo; los perfiles tipo 5 en la zona de abanicos están separados y de forma errática, por ello tratar de establecerlos a subzonas es difícil. La segunda zona corresponde a la llanura aluvial del río Cauca en la cual es muy clara la presencia dominante de los perfiles tipo 5. El perfil tipo 0 se encuentran en toda la zona de estudio, y dependiendo de su ubicación será de uno u otro tipo, por ello en el mapa se dibujaron en un color suave para no contaminar las tendencias.

Cabe anotar que la mayor parte de los estudios de suelos utilizan la prueba SPT, para el diseño de cimentaciones superficiales y profundas; por ello, hacen uso de las correlaciones desarrolladas en la Florida para arcillas (Schmertmann, 1967), que dan la carga última de diseño, más no los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos, que son los necesarios para los análisis dinámicos.

**Tabla 2.7.** Agrupación por Perfiles Tipo

Secuencia de materiales	No. de Perfiles	Perfil Tipo
F menores de 5 m	879	PT 0
F mayores de 5 m	459	PT 1
F-G	163	PT 2
F-G-F	29	PT 2
F-G-F-G	11	PT 2
F-G-F-G-F	3	PT 2
F-G-F-G-F-G	1	PT 2
F-G-F-G-F-G-F-G	1	PT 2
F-G-F-K	1	PT 2
F-G-F-S-G	1	PT 2
F-G-K	1	PT 2
F-G-S	4	PT 3
F-G-S-F	2	PT 3
F-G-S-F-G	1	PT 3
F-G-S-G	2	PT 3
F-K	8	PT 6
F-K-F	2	PT 6
F-K-F-K-F	1	PT 6
F-K-F-K-F-K	1	PT 6
F-S	369	PT 5
F-S-F	74	PT 5
F-S-F-G	6	PT 5
F-S-F-G-F-G	1	PT 2
F-S-F-S	26	PT 5
F-S-F-S-F	6	PT 5



Continuación Tabla 2.7

Secuencia de materiales	No. de Perfiles	Perfil Tipo
F-S-F-S-G	3	PT 5
F-S-F-S-G-F	1	PT 5
F-S-G	44	PT 4
F-S-G-F	3	PT 4
F-S-G-S	5	PT 4
F-S-G-S-F	1	PT 4
F-S-G-S-G	1	PT 4
G	14	PT 2
G-F	7	PT 2
G-F-G-F	2	PT 2
G-K	1	PT 6
G-S	4	PT 3
G-S-G	1	PT 3
K	20	PT 6
K-F	1	PT 6
K-S	1	PT 6
S	13	PT 5
S-F	19	PT 5
S-F-G	4	PT 5
S-F-G-F-S-F	1	PT 2
S-F-K	1	PT 6
S-F-S	9	PT 5
S-F-S-F	1	PT 5
S-G	6	PT 4
S-G-F	2	PT 4
S-G-S	1	PT 4
S-G-S-K	1	PT 4
<b>Total</b>	<b>2219</b>	<b>7</b>



---

## CAPITULO 3

---

### INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

Un adecuado modelamiento numérico de un fenómeno físico como la respuesta de un depósito de suelo ante un sismo, requiere de un conocimiento adecuado de las propiedades mecánicas del depósito tanto arealmente como en profundidad; por lo anterior y dada la heterogeneidad y magnitud de los materiales sobre los cuales se ubicada la ciudad de Cali, obligan a realizar algunas simplificaciones, que de otra manera harían imposible la solución de este tipo de problemas.

En esta sección se presenta en detalle los resultados obtenidos de la exploración del subsuelo llevada a cabo en la ciudad de Cali, la cual tuvo como objetivo primordial conocer la estratigrafía el terreno, además de obtener muestras de suelo inalteradas, que al ser sometidas a pruebas de laboratorio permitieron definir los parámetros geomecánicos requeridos para el modelamiento numérico de la respuesta sísmica y efectos locales (i.e. amplificación, licuación, corrimiento lateral).

Los trabajos de campo llevados a cabo por el Proyecto MZSCali, comprendió la realización de 30 perforaciones mecánicas, 8 ensayos CPTU, 6 pruebas DMT, 8 ensayos CPT y finalmente la ejecución de 18 ensayos de Down Hole, siendo estos últimos contratados por el INGEOMINAS. La distribución espacial de las perforaciones se presenta en la **Figura 3.1**.

En total se realizaron 1385 metros de perforación mecánica y 357 metros de sondeos con el piezocono sísmico, para un total de 1742 metros de exploración geotécnica y 725 metros de Down Hole.

#### 3.1 PERFORACIONES MECÁNICAS

El método de perforación empleado consistió en la rotación mecánica, para lo cual se emplearon dos equipos Long Year de propiedad del INGEOMINAS, que cuentan con el sistema Wire Line que facilita las labores de extracción de muestras de suelo relativamente inalteradas y reducen considerablemente los tiempos de perforación.

Las características principales como el nombre dado a la perforación, la profundidad de exploración alcanzada, el número de muestras tomadas y el código asignado en la BDG se presentan en la **Tabla 3.1**. Una descripción litológica detallada de las muestras obtenidas se presenta en el Anexo 2.

La Fotografía 3.1 muestra dos de las perforaciones mecánicas llevadas a cabo en el colegio INEM y en el Instituto Tobías Emmanuel. En la Fotografía 3.2 se observa la columna estratigráfica obtenida en el Edificio Vientos de Guadalupe. El procedimiento de empaquetado de las muestras se observa en la Fotografía 3.3, el cual comprendió la aplicación de parafina inmediatamente después de ser extraída cuidadosamente la muestra, paso seguido se envuelven en papel aluminio y cristaflex, por último, se guardan en bolsas plásticas y se colocan en tubos de PVC para ser enviadas al laboratorio de suelos.

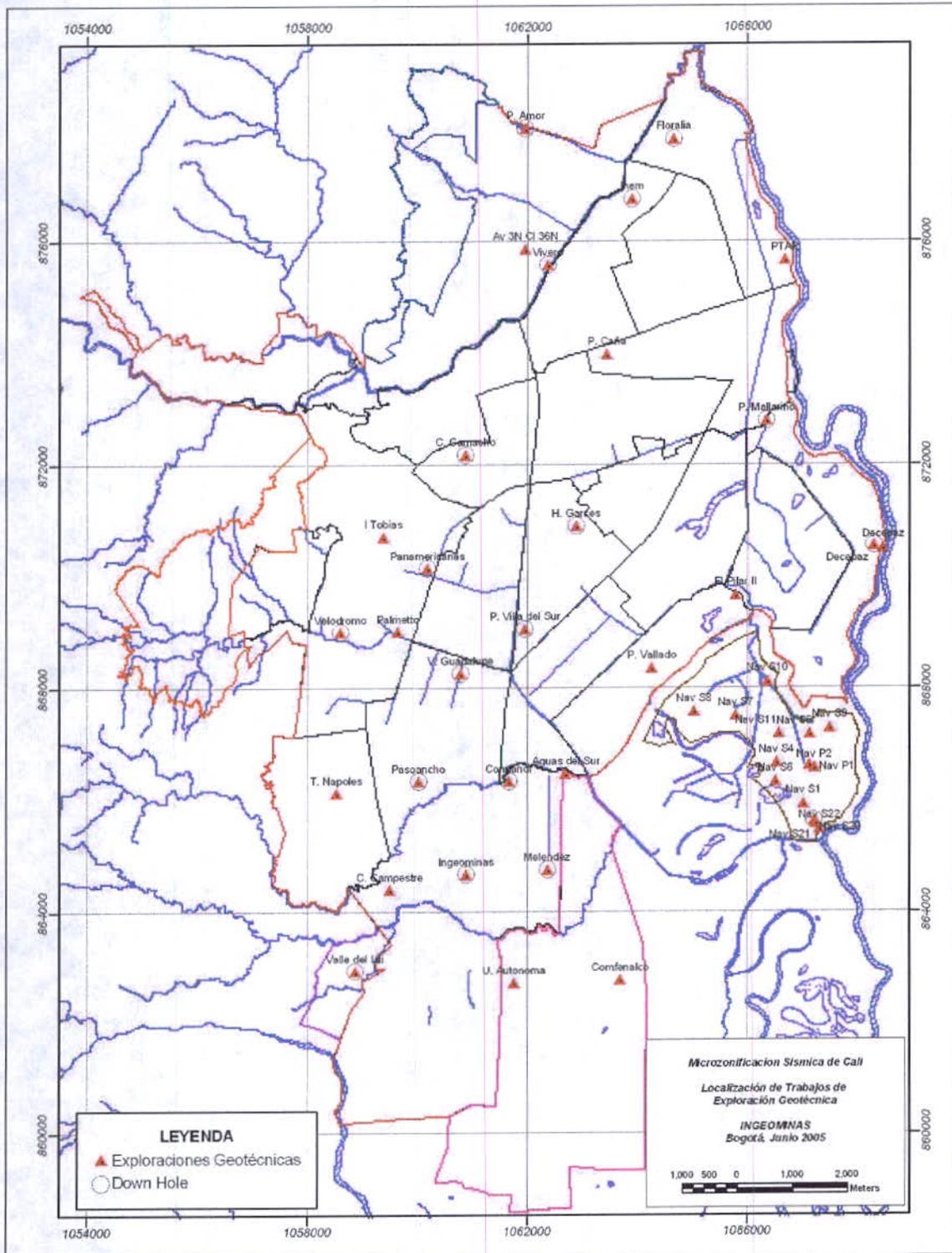
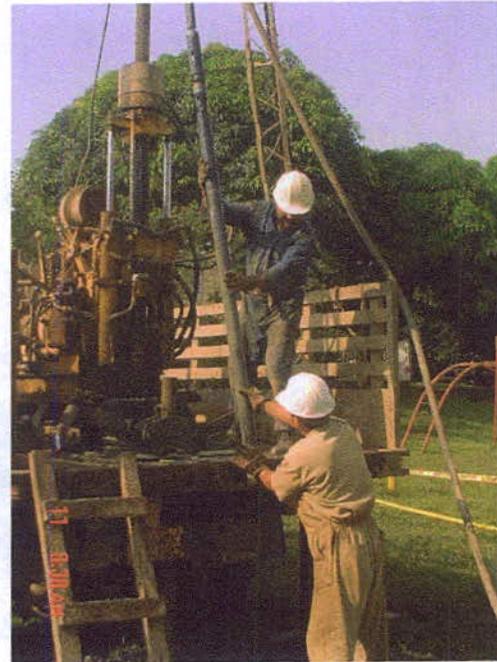


Figura 3.1. Localización de Trabajos de Exploración Geotécnica



Tabla 3.1. Características de las Perforaciones Geotécnicas realizadas en la ciudad de Cali

No.	NOMBRE	PROFUNDIDAD (m)	No. de Muestras	CODIGO BDG
1	Navarro A	62.5	53	NAVARP1
2	Navarro B	17.5	17	NAVARP2
3	Velódromo	66.8	65	VELODP3
4	Panamericanas	55.5	58	PANAMP4
5	Centro de Salud H. Garcés	50.5	33	HGARCP5
6	Parque de la Caña	19.1	9	PCANAP6
7	Parque del Amor	50.3	32	PAMORP7
8	Parque Villa del Sur	50.6	39	PVSURP8
9	Universidad Autónoma	4.2	2	UAUTOP9
10	Planta de Puerto Mallarino	52.6	20	PMALLP10
11	Parque el Vallado	50.6	10	PVALLP11
12	INGEOMINAS	55.5	32	INGEOP12
13	Decepaz	32	9	DECEPP13
14	Valle del Lili	55	24	VLILIP14
15	Tanques de Nápoles	22	11	TNAPOP15
16	Comfandi	40	18	COMFAP16
17	Club Campestre	25	7	CCAMPP17
18	Aguas del Sur (Ciudad Real)	50.6	23	AGSURP18
19	Pasoancho con Cr 80	53	30	PCR80P19
20	Comfenalco	10	5	COMFEP20
21	Palmetto Plaza	100.8	80	PALMEP21
22	Instituto Tobías	50.6	35	ITOBIP22
23	PTAR	50.8	35	PTARP23
24	Vivero Municipal	50.4	36	VIVERP24
25	INEM	52.3	41	INEMP25
26	Floralía	50.2	19	FLORP26
27	Meléndez (Makro)	50.7	22	MELENP27
28	Colegio J. Camacho	50.2	36	CAMACP28
29	El Pilar II	53.2	26	PILARP29
30	Vientos de Guadalupe	52.1	35	GUADAP30
	<b>TOTAL</b>	<b>1385 metros</b>	<b>862 Muestras</b>	<b>30 Perforaciones</b>



**Fotografía 3.1.** Equipo Long Year trabajando en el INEM y en el Instituto Tobías Enmanuel



**Fotografía 3.2.** Columna estratigráfica con testigos de suelo en Vientos de Guadalupe



**Fotografía 3.3.** Embalaje de las muestras de suelo

### 3.2 ENSAYOS DE CAMPO

El equipo con el cual se realizaron las pruebas in situ fue el Piezocono Sísmico (CPTU), Dilatómetro (DMT) y Cono Dinámico (CPT). Una prueba realizada con dicho equipo en la Avenida 3N con Calle 36, al norte de la ciudad, se presenta en la Fotografía 3.4.



**Fotografía 3.4.** Equipo PAGANI realizando sondeo DMT en la Avenida 3N con Calle 36. A la izquierda Piezocono, a la derecha equipo de dilatómetro.



**Tabla 3.2.** Relación de Sondeos con Piezocono.

NOMBRE	TIPO DE SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	CODIGO BDG
Navarro S1	Dilatometro DMT	20	NAVARS1
Navarro S2	Piezocono CPTU	12	NAVARS2
Navarro S3	Piezocono CPTU	20	NAVARS3
Navarro S4	Cono Dinámico CPT	20	NAVARS4
Navarro S5	Cono Dinámico CPT	20	NAVARS5
Navarro S6	Cono Dinámico CPT	20	NAVARS6
Navarro S7	Cono Dinámico CPT	17	NAVARS7
Navarro S8	Cono Dinámico CPT	19	NAVARS8
Navarro S9	Cono Dinámico CPT	19	NAVARS9
Navarro S10	Cono Dinámico CPT	19	NAVARS10
Navarro S11	Cono Dinámico CPT	18	NAVARS11
Vientos de Guadalupe	Dilatometro DMT	9	GUADAS12
Vientos de Guadalupe	Piezocono CPTU	10	GUADAS13
INGEOMINAS	Dilatometro DMT	21	INGEOS14
INGEOMINAS	Piezocono CPTU	19	INGEOS15
Decepaz	Dilatometro DMT	10	DECEPS16
Decepaz	Piezocono CPTU	16	DECEPS17
Av 3N CI 36	Dilatometro DMT	10	AV3NS18
Av 3N CI 36	Dilatometro DMT	10	AV3NS19
Navarro S20	Piezocono CPTU	15	NAVARS20
Navarro S21	Piezocono CPTU	16	NAVARS21
Navarro S22	Piezocono CPTU	17	NAVARS22
<b>TOTAL</b>	<b>8 CPTU 6 DMT 8 CPT</b>	<b>357 metros</b>	<b>22 Sondeos</b>

A continuación se realiza una breve descripción de las diferentes técnicas utilizadas, así como de las correlaciones utilizadas.

### 3.2.1 Piezocono Sísmico - Prueba CPTU

Una de las pruebas in situ más sofisticadas realizadas en la exploración fue la utilización del piezocono sísmico, que permite medir simultáneamente la resistencia por punta, la fricción lateral y la presión de poros. A partir de estos resultados y mediante el uso de correlaciones semiempíricas, es posible identificar el tipo de suelo, parámetros de resistencia y características de compresibilidad del material explorado.

En el área de estudio la utilización del piezocono se limitó a aquellas zonas donde se tenía identificado la presencia de materiales arcillosos, limosos o arenosos, debido a que en depósitos donde haya presencia de material granular tipo grava, se pueden ocasionar daños importantes al equipo. Desde este punto de vista, se realizaron 5 pruebas en el Sector de Navarro y 1 en Decepaz con el fin de estudiar los fenómenos de licuación y de corrimiento lateral. Además se realizaron en INGEOMINAS y en el Edificio Vientos de Guadalupe para



estudiar los materiales finos superficiales. Los registros y parámetros calculados a partir de estos se muestran en el Anexo 2 de exploraciones geotécnicas.

A continuación se presentan las características principales de las pruebas realizadas y las correlaciones empleadas para la determinación del tipo de suelo y parámetros de resistencia y compresibilidad.

### 3.2.1.1 Descripción de la prueba

La prueba de penetración con cono consiste en introducir verticalmente dentro del suelo un dispositivo con punta cónica de  $10 \text{ cm}^2$  de área proyectada, con un ángulo de  $60^\circ$  y elementos para la medición de la resistencia a la penetración  $q_c$ , fricción lateral  $f_s$  y presión de poros  $u$  para el caso CPTU, penetrando el terreno a una velocidad constante de 20 mm/seg, mediante un sistema de varillas conectado a un conjunto de gatos hidráulicos.

El propósito general de la prueba es obtener información detallada sobre la estratigrafía del depósito y las variaciones de las propiedades geomecánicas en profundidad. Además, puede medirse la disipación en el tiempo del exceso de presión de poros generada durante el hincado.

Las pruebas CPT y CPTU tienen las siguientes aplicaciones principales: i) determinar la estratigrafía del subsuelo e identificación de los materiales presentes, ii) estimar parámetros geotécnicos, iii) proveer resultados para diseño directamente, y iv) evaluar el potencial de licuación.

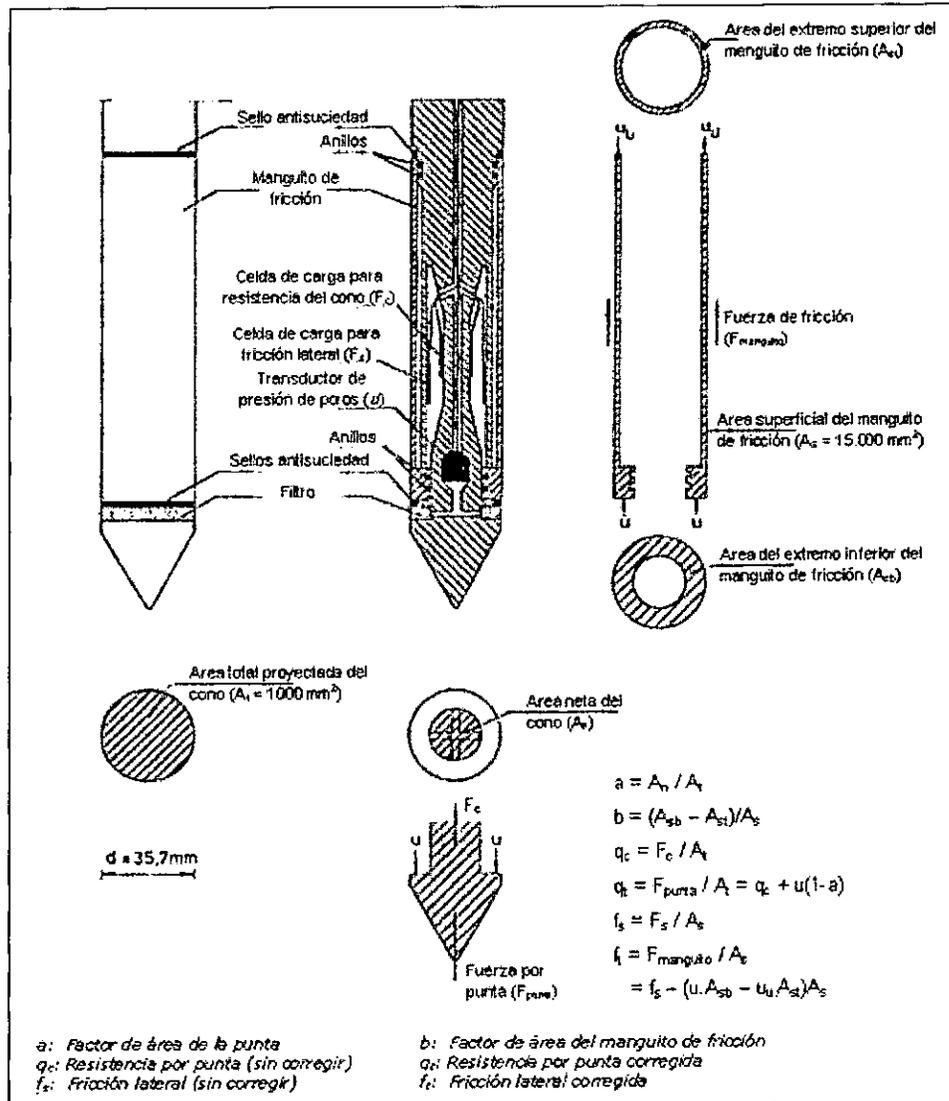
En la **Figura 3.2** se ilustra la configuración del cono y sus principales aditamentos; de igual manera se presenta el diseño típico del Piezocono, haciendo énfasis en la influencia de la presión de poros sobre los valores medidos de resistencia por punta y resistencia por fricción.

### 3.2.1.2 Identificación del tipo de suelo

La prueba de penetración con piezocono, al no tener contacto directo con los materiales estudiados, no es posible efectuar una clasificación del suelo basada en la distribución por tamaño de grano, pero es posible, mediante la aplicación de cartas de clasificación, obtener una aproximación sobre el tipo de comportamiento del suelo.

La experiencia ha mostrado que las mediciones en el manguito de fricción no son tan exactas como  $q_t$  y  $u$ , pero generalmente puede hacerse una clasificación más confiable del suelo usando todos los tres datos, es decir,  $q_t$ ,  $f_t$  y  $u$  (Lunne et al., 1997).

Un problema reconocido por los diferentes investigadores, relacionado con las gráficas de clasificación que se basan en  $q_t$  y  $R_f$ , consiste en que los suelos pueden cambiar en su clasificación aparente a medida que la resistencia de penetración del cono aumenta con la profundidad, debido a que  $q_t$ ,  $f_t$  y  $u$  tienden a aumentar con el esfuerzo de sobrecarga. Este problema se minimiza normalizando los datos de CPTU mediante el uso de los siguientes parámetros, como lo sugirió Wroth (1984, 1988):



**Figura 3.2.** Ejemplo de diseño de un piezocono y la influencia de la presión de poros sobre los valores medidos de resistencia por punta y fricción en el manguito (Larsson & Mulabbić, 1991)

Resistencia del cono  
normalizada

$$Q_c = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$$

La relación de fricción  
normalizada

$$Fr = \frac{fs}{q_t - \sigma_{vo}}$$

La relación de presión de  
poros

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{vo}}$$

Donde  $q_t$  es la resistencia del cono corregida,  $\sigma_{vo}$  y  $\sigma'_{vo}$  son los esfuerzos verticales total y efectivo,  $fs$  es la resistencia por fricción,  $\Delta u = u_2 - u_0$  para  $u_2$  igual a la presión de poros medida entre el cono y el manguito de fricción y  $u_0$  la presión de poros de equilibrio (hidrostática).

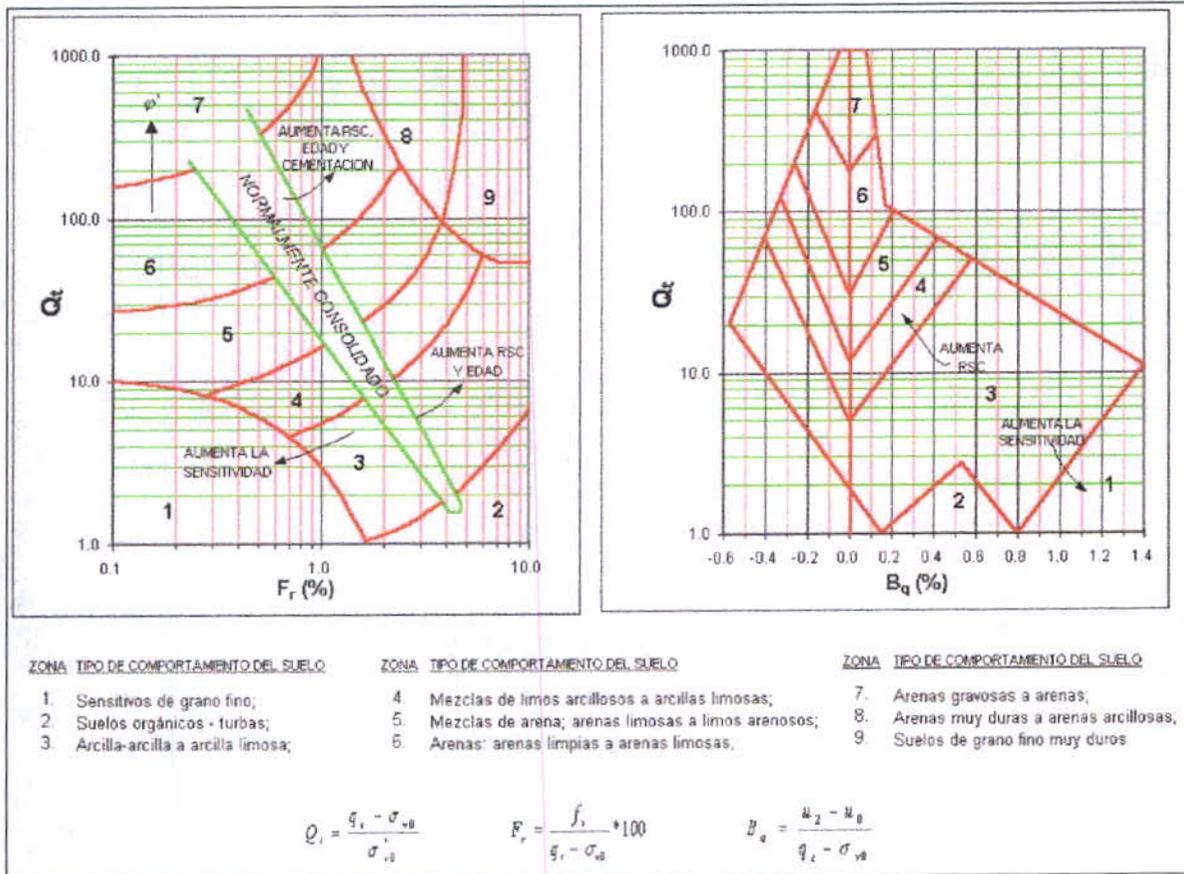
Como se observa en las ecuaciones anteriores, los parámetros normalizados involucran el esfuerzo vertical total o efectivo, lo cual hace que se requieran como datos de entrada el peso unitario del suelo y las condiciones de agua subterránea.

La determinación del peso unitario de las diferentes capas del subsuelo con un grado de precisión adecuado, sólo es posible mediante la realización de perforaciones con toma de muestras y ensayos de laboratorio, debido a que con el piezocono únicamente se puede obtener una aproximación burda de los valores de este parámetro. Esta es una de las principales limitantes que tiene el uso del piezocono y que obliga a realizar perforaciones complementarias con toma de muestras para ensayos de laboratorio, a menos que se tenga la suficiente información sobre este parámetro en el depósito que se esté analizando.

Entre las cartas de clasificación propuestas más recientemente y que están basadas en correlaciones que involucran los parámetros normalizados de la resistencia por punta, la resistencia por fricción y la presión de poros medida durante la prueba, está la de Robertson (Robertson, 1990).

En la **Figura 3.3** se ilustran las dos gráficas utilizadas para el sistema de clasificación, el cual incorpora los tres datos de CPTU. Para CPT donde sólo se dispone de datos de  $q_c$  y  $f_s$  se puede usar la gráfica de la izquierda. Según Lunne (Lunne et al., 1997), el error al usar los datos de  $q_c$  no corregidos generalmente influirá sólo sobre los datos de la parte baja de la gráfica donde la resistencia del cono normalizada es menor de 10 aproximadamente. Esta parte de la gráfica corresponde a suelos blandos de grano fino donde los valores de la resistencia por punta  $q_c$  pueden ser pequeños y la presión de poros de penetración  $u$  puede ser grande.

La gráfica de clasificación incluye una zona que representa aproximadamente comportamiento normalmente consolidado del suelo y una guía para indicar la variación de datos de CPT y CPTU normalizados para cambios en: relación de sobreconsolidación (RSC), edad y sensibilidad ( $S_t$ ) para suelos de grano fino donde la penetración del cono generalmente es no drenada; y RSC, edad, cementación y ángulo de fricción para suelos no cohesivos donde la penetración del cono generalmente es drenada.



**Figura 3.3.** Carta de clasificación del tipo de comportamiento del suelo basada en datos normalizados de CPT/CPTU (Robertson, 1990) (Tomada de Guerrero, 2002)

Generalmente, suelos que caen en las zonas 6 y 7 representan penetración aproximadamente drenada, mientras que, suelos en zonas 1, 2, 3 y 4 representan penetración no drenada. Suelos que caen en las zonas 5, 8 y 9 pueden representar penetración parcialmente drenada.

Según Robertson (Robertson, 1990), las gráficas de la **Figura 3.3** aún son globales y deben usarse como una guía para definir el tipo de comportamiento del suelo basado en los datos de CPT y CPTU. Factores como los cambios en la historia de esfuerzos, en los esfuerzos in situ, la sensibilidad, dureza, macrofábrica, mineralogía y relación de vacíos también influirán en la clasificación.

### 3.2.1.3 Parámetros de resistencia y compresibilidad

Debido a la existencia de una gran cantidad de correlaciones se han escogido aquellas cuyas propiedades de los materiales sean similares a los presentes en la ciudad de Cali; debido a que dicha información está fuera del alcance del presente estudio, se sugiere consultar a García, 2003. Para nuestro caso en particular se utilizaron las siguientes correlaciones para suelos finos:

Coefficiente de presión de  
tierras  $K_0$  (Kulhawy &  
Meyne, 1990)

$$K_0 = 0.1 \left( \frac{q_c - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$$

Resistencia al corte no  
drenada  $S_u$  (Kjeksted, 1990)

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{Nk}; Nk = 15$$

Módulo confinado  $M$   
(Kulhawy & Meyne, 1990)

$$M = 8.25(q_c - \sigma_{vo})$$

Módulo Cortante máximo  
 $G_0$  (Mayne, 1993)

$$G_0 = 99.5(Pa)^{0.305} \frac{(q_c)^{0.695}}{(e_0)^{1.13}}$$

Para los estratos granulares de arena o grava se recomienda las siguientes correlaciones:

Densidad relativa  $D_r$  (Jamio  
& Kowsky, 1985)

$$D_r = -98 + 66 \cdot \log_{10} \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right)$$

Ángulo de fricción  $\phi$   
(Roberson, 1983)

$$\tan \phi = 0.1543 \cdot \ln \left( \frac{q_c}{\sigma'_{vo}} \right) + 1.251$$

Módulo confinado  $M$  (Michael  
& Gardner, 1975)

$$M = 4q_c \rightarrow q_c < 10$$
$$M = 2q_c + 20 \rightarrow 10 < q_c < 50$$

Módulo Cortante máximo  $G_0$   
(Rix & Stokoe, 1992)

$$G_0 = q_c \cdot 1634 \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right)^{-0.75}$$

Es importante mencionar que para estratos finos compuestos por arcillas y limos la obtención de los parámetros de resistencia es muy limitada y en general se recomienda la elaboración de ensayos. Cabe anotar que estas correlaciones han sido obtenidas con base en ensayos y pruebas realizadas sobre suelos formados en ambientes geológicos diferentes al colombiano. Por ello, "la condición fundamental para la aplicación confiable de correlaciones empíricas, es que correspondan a suelos muy similares y que preferiblemente se obtengan para los suelos particulares a los que se pretende aplicar" (Lunne et al, 1997). Para este estudio en particular se realizó un muestreo en cercanías de las pruebas CPTU con el fin de verificar las correlaciones utilizadas.

### 3.2.2 Dilatómetro DMT

El DMT es un interesante ensayo geotécnico in situ carga-deformación, con deformación controlada y cuyas aplicaciones abarcan tanto los suelos granulares como los cohesivos, de poco a muy densos y de blandos a duros, respectivamente (Marchetti, 1975; Marchetti, 1980). Desde el punto de vista geológico-geotécnico presenta tres aplicaciones principales:

- Determinar el perfil estratigráfico del terreno.
- Evaluar los parámetros geotécnicos de las capas investigadas.
- Calcular la capacidad portante y asentamientos del terreno frente a solicitaciones externas.

Al igual que con el piezocono la utilización del dilatómetro se limitó a aquellas zonas donde se tenía identificada la presencia de materiales arcillosos, limosos o arenosos, debido a que en depósitos donde haya presencia de material granular tipo grava podrían dañar la paleta.

Desde este punto de vista se realizó una prueba en el Sector de Navarro y otra en el Sector de Decepaz para estudiar los fenómenos de licuación y de corrimiento lateral. Adicionalmente, se realizaron pruebas en INGEOMINAS, Edificio Vientos de Guadalupe y Avenida 3N con Calle 36, para estudiar los materiales finos superficiales. Los registros y parámetros calculados a partir de estos se muestran en el Anexo 2.

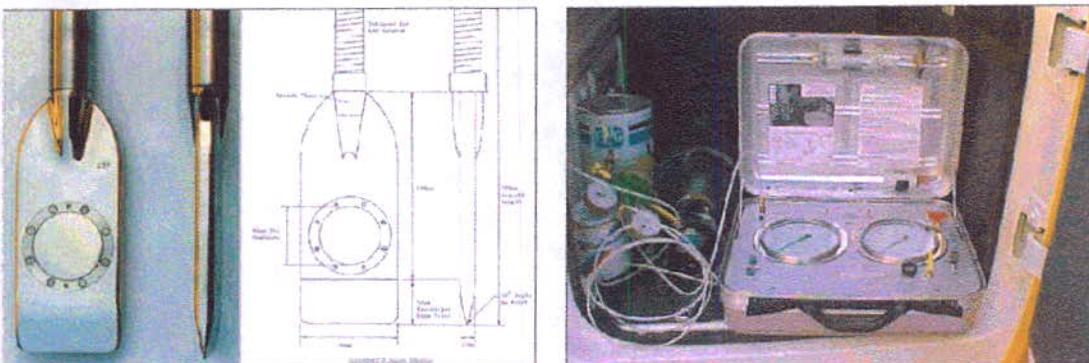
A continuación se presentan las características principales de las pruebas realizadas, las correlaciones empleadas para la inferir el tipo de suelo y los parámetros de resistencia y compresibilidad.

### 3.2.2.1 Descripción de la prueba

El Dilatómetro Plano de Marchetti (DMT) consiste en una paleta plana que se hinca en el terreno y esta provista de una fina membrana metálica circular, expandible horizontalmente en el suelo mediante gas a presión (Fotografía 3.5). La hincada de la paleta en el terreno se realiza mediante penetración estática, utilizando para ello el Equipo PAGANI.

Una vez hincado la paleta a la profundidad de exploración, la membrana es inflada mediante gas presurizado, tomándose las siguientes lecturas:

- ▲ Lectura A: corresponde a la presión necesaria para comenzar a mover la membrana
- ▲ Lectura B: es la presión requerida para producir una deformación de 1.1 mm en el terreno.



Fotografía 3.5. Paleta y central de lectura del DMT.



Las lecturas de campo A y B se corrigen por los efectos de la rigidez propia de la membrana para determinar las presiones  $P_0$  y  $P_1$  (Marchetti et al., 2001):

$$P_0 = A + \Delta A$$

$$P_1 = B + \Delta B$$

Donde:

$\Delta A$  es la presión exterior que debe ser aplicada a la membrana al aire libre para que se mantenga en reposo sobre su apoyo,

$\Delta B$  es la presión interna necesaria para desplazar la membrana 1.1mm.

### 3.2.2.2. Parámetros primarios

A partir de los valores de  $P_0$  y  $P_1$  se derivan los tres parámetros intermedios característicos de este ensayo:

$I_D$  Índice de material, relacionado con el tipo de suelo.

$K_D$  Índice de esfuerzo horizontal, relacionado con la relación de sobreconsolidación (OCR).

$E_D$  Módulo Dilatométrico, determinado a partir de la teoría de la elasticidad.

A continuación se describen los conceptos básicos necesarios para la interpretación y valoración de los resultados.

#### **Índice del Material o tipo de suelo $I_D$**

Este índice está definido por:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} = \frac{\Delta P}{P_0 - u_0}$$

Donde  $u_0$  es la presión intersticial.

En general,  $I_D$  es un indicativo del tipo de suelo; no obstante  $I_D$  puede clasificar a un suelo arcilloso como limoso y viceversa. Al utilizar este parámetro se debe tener presente que la clasificación del suelo no es el resultado de un análisis granulométrico, sino que responde a parámetros que reflejan un comportamiento mecánico del medio, en cierto modo un índice de rigidez (Marchetti, 1999).

De acuerdo a Marchetti (Marchetti, 1980), el tipo de suelo se identifica como:

Arcilla  $0.1 < I_D < 0.6$

Limo  $0.6 < I_D < 1.8$

Arena  $1.8 < I_D < 10$



### **Índice de Esfuerzo Horizontal $k_D$**

Definido por:

$$k_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}}$$

Donde

$\sigma'_{v0}$  es el esfuerzo efectivo vertical

$k_D$  es la base para la interpretación de varios parámetros del suelo, y es la clave para el resultado del ensayo. Este parámetro depende del esfuerzo efectivo horizontal y está relacionado con la razón de sobreconsolidación del suelo (OCR).

El perfil  $k_D$  es similar en forma al perfil de OCR y, por tanto, es sumamente útil para entender la historia de esfuerzos de un depósito (Jamiolkowski et al., 1988).

### **Módulo DMT $E_D$**

$E_D$  se calcula a partir de la teoría de la elasticidad, y presenta la siguiente forma:

$$E_D = 34.7 \cdot \Delta P$$

Este parámetro no debe utilizarse en sí mismo como un módulo de deformación, fundamentalmente por la falta de información de la historia de esfuerzos.

### **3.2.2.3 Parámetros de Resistencia**

**Angulo de Fricción ( $\phi$ ).** Existen dos métodos para determinar el ángulo de fricción de arenas a partir del DTM (Marchetti, 1997)

Método 1: Consiste en determinar  $K_0$ , y utilizar el ábaco de la **Figura 3.4**, para estimar  $\phi$  a partir de  $K_0$  y  $q_c$ , es decir implica dos pruebas (CPT y DTM). Esta ecuación es conservadora según Marchetti, y solo debe aplicarse si no se dispone de información más precisa.

### **3.2.2.4 Parámetros de deformación**

**Módulo Confinado  $M$ .** El Módulo  $M$  determinado a partir de los ensayos DMT (designado como  $M_{DMT}$ ) corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento  $\sigma'_{v0}$  del ensayo, y es igual al determinado en el edómetro. La posibilidad de estimar el módulo confinado tanto en suelos cohesivos como granulares es uno de los principales aportes del ensayo DMT.  $M_{DMT}$  se obtiene aplicando al parámetro  $E_D$  el correspondiente factor de corrección  $R_M$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$M_{DMT} = R_M \cdot E_D$$

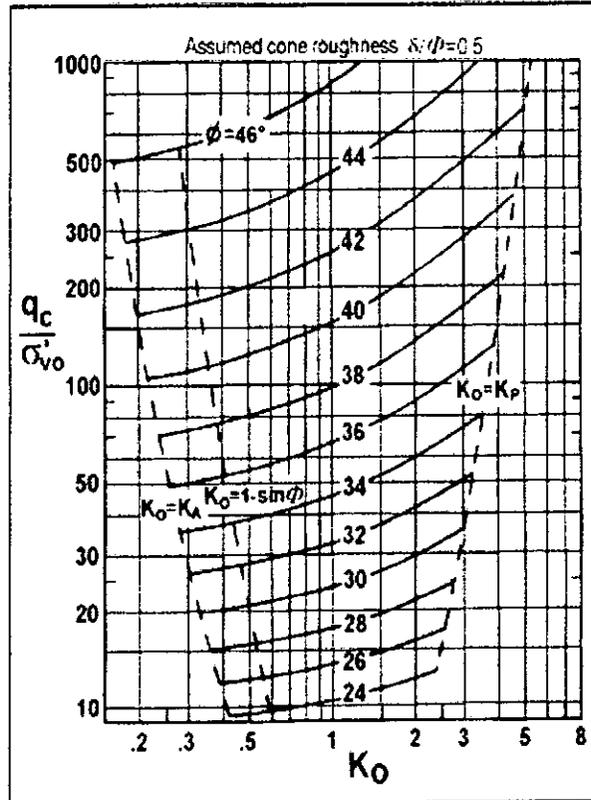


Figura 3.4. Ábaco  $\phi$ ,  $K_0$  y  $q_c$  de acuerdo a Durgunoglu & Mitchel (compilado por (Marchetti, 1975))

Método 2: Para este caso,  $\phi$  se determina a partir de  $K_D$  mediante la siguiente ecuación (Marchetti, 1997):

$$\phi_{DTM} = 28^\circ + 14.6 \cdot \text{Log} K_D - 2.1 \cdot \text{Log}^2 K_D$$

Las ecuaciones que definen  $R_M$  en función de  $I_D$  y  $K_D$  (Marchetti, 1980) se presentan a continuación, nótese que el valor de  $R_M$  se incrementa con  $K_D$ .

$I_D < 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \text{ Log } K_D$
$I_D > 3$	$R_M = 0.5 + 2 \text{ Log } K_D$
$0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \cdot \text{Log } K_D$
	$R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$
$K_D > 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \text{ Log } K_D$
$R_M < 0.85$	$R_M = 0.85$

**Módulo Young  $E$ .** El módulo Young  $E$  del esqueleto del suelo puede obtenerse a partir del Módulo confinado ( $M_{DMT}$ ), utilizando la teoría de la elasticidad; mediante la siguiente expresión (Marchetti et al., 2001):

$$E' = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \cdot M_{DMT}$$

Para una relación de Poisson que fluctúe entre  $\nu = 0.25-0.3$ , el módulo de elasticidad será:

$$E = 0.8 \cdot M_{DMT}$$

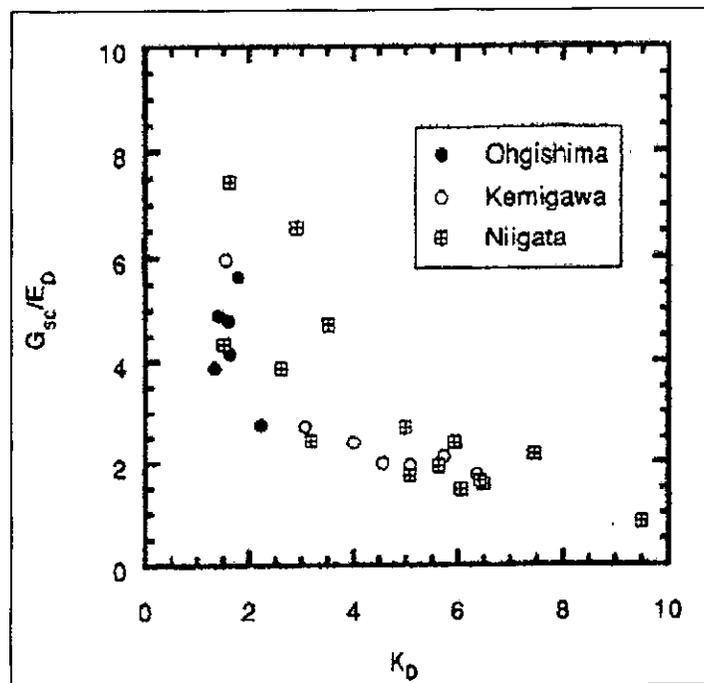
**Módulo de Corte Máximo.** En el artículo original de Marchetti (Marchetti, 1980), no se presenta una correlación entre  $G_{max}$  y el DMT.

Algunos investigadores han intentado encontrar este tipo de correlaciones pero con poco éxito; dentro de tales trabajos se destaca el de Tanaka (Tanaka & Tanaka, 1998), quien relaciona  $G_{sc}/E_D$  vs  $K_D$  (Figura 3.5). El autor obtiene que en la medida que se incrementa  $K_D$ , la relación  $G_{sc}/E_D$  disminuye, desafortunadamente los datos son dispersos como para intentar proponer una correlación.

### 3.2.3 Cono dinámico CPT

Esta prueba de campo consiste en hincar un cono de acero y registrar el número de golpes para introducirse 30 cm, equivalentes al ensayo de penetración estándar SPT. La prueba tiene varias ventajas sobre el SPT convencional:

- Es un ensayo rápido y económico.
- Permite obtener resultados de resistencia en forma directa.
- Se obtiene un registro continuo de la resistencia del suelo; sin embargo requiere realizar perforaciones adicionales para la identificación del tipo de material.



**Figura 3.5.** Relación entre el módulo de corte  $G_{sc}$  obtenido a partir del cono sísmico y  $E_D$  del DMT contra  $K_D$  para suelos arenosos (Tanaka & Tanaka, 1998).

Esta prueba se realizó en el sector de Navarro con el fin de determinar la susceptibilidad a la licuación del depósito arenoso. En total se realizaron 8 pruebas cuyos registros y parámetros calculados a partir de estos se muestran en el Anexo 2.

### 3.2.3.1 Parámetros calculados.

Los resultados de esta prueba se correlacionaron con las siguientes expresiones para estimar la densidad relativa, el ángulo de fricción y el módulo de corte máximo para materiales arenosos.

Densidad relativa  $D_r$   
(Cubrinouski & Ishihara, 1999)

$$D_r = \left( \frac{N \cdot \left( 0.23 - \frac{0.06}{D_{50}} \right)^{1.7}}{9} \cdot \left( \frac{Pa}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \right)^{0.5}$$

Ángulo de fricción  $\phi$   
(Hatanaka & Uchida, 1996)

$$\phi = (20 \cdot N)^{0.5} + 20$$

Módulo Cortante máximo  $G_0$   
(Seed et al., 1986)

$$G_0 = 35 - 1000 N_{60}^{0.34} (\sigma'_v)^{0.4}$$

Finalmente, en la **Tabla 3.3**, se presenta un resumen de las correlaciones a utilizar mediante el SPT, CPTU y DMT.

### 3.2.4 Ensayos Down Hole

Estos ensayos fueron realizados por el Consorcio INGECIENCIAS - Ulloa Ltda, bajo la supervisión de personal especializado de INGEOMINAS. El equipo empleado fue un sismógrafo de 12 canales con computador externo, con sonda triaxial y los accesorios correspondientes. Las ondas se produjeron mediante el empleo de golpes de almádena sobre el suelo.

Los ensayos de Down Hole se realizaron con el objetivo de:

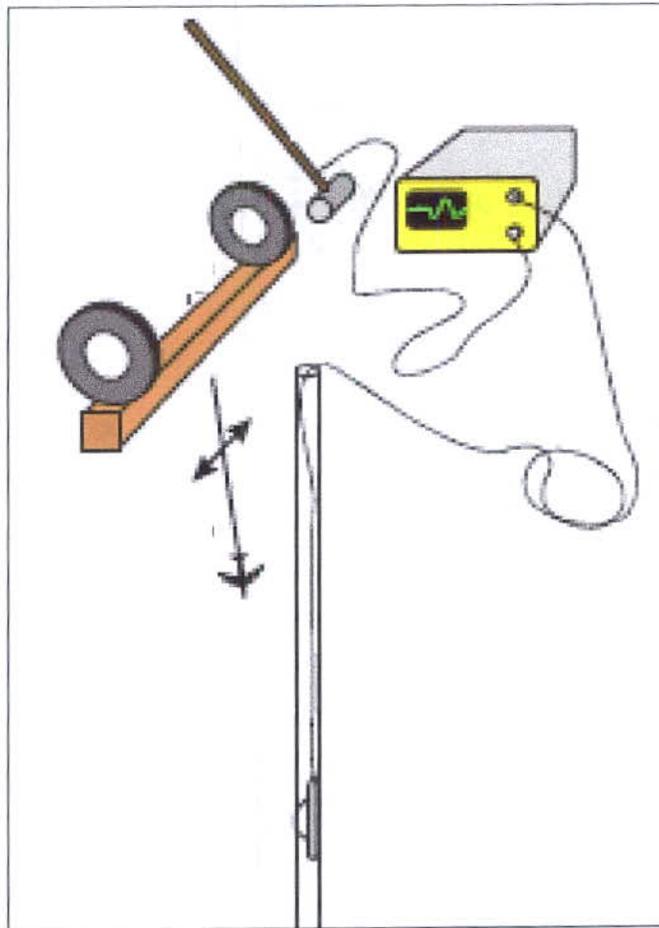
- ▲ Obtener las velocidades compresionales ( $V_p$ ) y de corte ( $V_s$ ) para cada estrato del subsuelo.
- ▲ Calcular los módulos dinámicos del subsuelo, es decir, el módulo de corte  $G$ , el módulo de elasticidad  $E$ , el módulo Bulk y la relación de poisson.

#### 3.2.4.1 Metodología de la prueba

Un ensayo Down Hole se puede representar mediante el esquema de la **Figura 3.6**, el cual consiste en colocar un vehículo sobre una viga de tal manera que se pueda golpear ésta por los lados. De esa manera se generan señales ricas en ondas de corte que son registradas por el geófono que las trasmite al sismógrafo.

**Tabla 3.3.** Correlaciones utilizadas para SPT, CPTU y DMT (García, 2003)

TIPO DE PRUEBA SPT		
Parámetro	Expresión	Autor
Densidad Relativa	$D_r = 21 \left( \frac{N}{\frac{\sigma'_v}{9.8} + 0.07} \right)^{0.5}$	[Meyerhoff, 1957]
	$D_r = \left\{ \frac{N(0.29 + \frac{0.08}{D_{90}})^{1.7}}{9} \left( \frac{98}{\sigma'_v} \right)^{1/2} \right\}^{1/2}$	[Cubrinovski & Ishihara, 1999]
Ángulo de fricción	$\phi = (12N)^{0.5} + 25$ $\phi = (12N)^{0.5} + 20$	[Dunham, 1954]
	$\phi = (20N)^{0.5} + 15$ $\phi = (15N)^{0.5} + 15 \leq 45 (N > 5)$	[Association, 1990]
	$\phi = (0.3N)^{0.5} + 27$ $\phi_d = (20N_1)^{0.5} + 20$	[Peck & Hanson, 1953] [Hatanaka & Uchida, 1996]
Módulo de Corte Máximo	$G_{max} = 35 - 1000N_{95}^{0.34} (\sigma'_v)^{0.4}$	[Seed et al., 1986]
TIPO DE PRUEBA CPTU		
Parámetro	Expresión	Autor
Densidad Relativa	$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left  \frac{q_c}{C_0(\sigma'_v)^{C_1}} \right $	[Baldi et al., 1986]
Parámetros de estado	$\frac{q_c - p}{p'} = k \exp(-m\psi)$ $\psi = \left( \frac{A}{B} - \Gamma \right) - \left\{ \frac{\ln \left( \frac{V_{21}}{B(K_0)^{m+1}} - \lambda_{1n} \right) \ln \left( \frac{\sigma'_v}{3} (1 + 2K_0) \right) \right\}$	[Been et al., 1987] [Robertson et al., 1995]
Esfuerzo Horizontal	$\frac{q_c}{F_a} = A \left( \frac{\sigma'_v}{F_a} \right)^{0.5}$ $\left( \frac{q_c - p_0}{p_0} \right) \Gamma_{0=100kPa} \approx \frac{q_c - p_0}{p_0} \left( \frac{p_0}{100} \right)^{0.373}$	[Housby & Hitchman, 1988] [Konrad, 1995]
Módulo confinado	$M = \alpha q_c$ $M_t = k_m P_a \left( \frac{\sigma'_{va}}{F_a} \right)$	[Mitchel & Gardner, 1975] [Baldi et al., 1981]
	$\frac{S_v}{\sigma'_v} = \frac{M}{C} \left\{ \frac{\exp \left[ \frac{V_{21}}{21(K_0)^{m+1}} - \lambda_{1n} \ln \left( \frac{\sigma'_v}{3} (1 + 2K_0) \right) \right]}{\exp \left( \frac{A}{B} - \Gamma \right)} \right\} (1 + 2K_0)$	[Sladen, 1989]
Módulo de Corte Máximo	$\left( \frac{G_0}{q_c} \right)_{prom} = 1634 \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right)^{-0.75}$	[Rix & Stokoe, 1992]
TIPO DE PRUEBA DMT		
Parámetro	Expresión	Autor
Índice del Material o tipo de suelo	$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} = \frac{\Delta P}{P_0 - u_0}$	[Marchetti, 1980]
Índice de Esfuerzo Horizontal	$k_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}}$	[Jamiolkowski et al., 1988]
Módulo DMT	$E_D = 34.7 \Delta P$	
Cociente de presión de tierras en reposo	$K_0 = 0.376 + 0.095 K_D - 0.0017 \frac{q_c}{\sigma'_{v0}}$	[Marchetti, 1975]
Ángulo de Fricción	$\phi_{DMT} = 28^\circ + 14.6 \log K_D - 2.1 \log^2 K_D$	[Marchetti, 1997]
Módulo Confinado	$M_{DMT} = R_M E_D$	[Marchetti, 1980]
Módulo Young	$E' = \frac{1 + \nu(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} M_{DMT}$	[Marchetti et al., 2001]



**Figura 3.6.** Esquema explicativo de la ejecución del Ensayo Down Hole.

En el ensayo Down Hole se miden las ondas no solo en superficie sino en todos los estratos, por lo cual se utiliza una perforación de modo que el geófono utilizado es una sonda triaxial que se introduce dentro de la perforación, permitiendo medir tanto ondas verticales como horizontales, es decir, ondas compresionales y cortantes. La viga puede ser reemplazada por una pequeña trinchera y golpear en la paredes internas cuando no hay acceso de vehículo.

El procedimiento realizado para llevar a cabo un ensayo consiste esencialmente en:

- ▲ Instalar el sismógrafo con sus accesorios y conectar la sonda triaxial.
- ▲ Colocar la sonda en el fondo o en el principio de la perforación, adherida firmemente a uno de los lados.
- ▲ Generar ondas compresionales mediante golpes verticales en el suelo.
- ▲ Leer el tiempo de llegada y grabarlo.
- ▲ Generar ondas de corte mediante golpes laterales en las paredes de una trinchera.

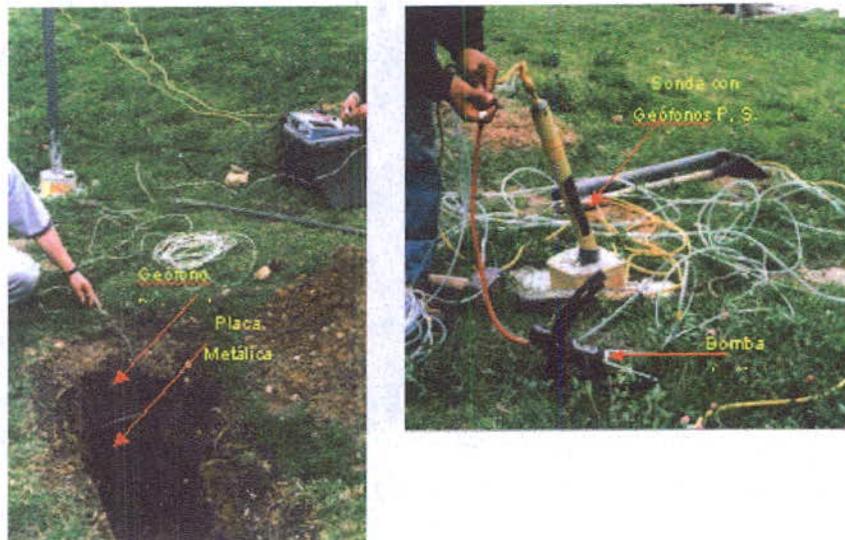
Los golpes deben darse a un lado primero y luego al otro, grabando cada señal por separado.

- ▲ Leer los tiempos de llegada y grabarlo.
- ▲ Subirla sonda medio metro o hasta la profundidad que se desee y repetir el procedimiento.

El primer golpe se hace para obtener una señal sísmica normal en la cual el tiempo de las ondas refractadas llega primero que las demás, siendo fácilmente distinguibles en el sismograma. Como quiera que las ondas de corte (shear waves) llegan después mezcladas con las demás ondas, es difícil y a veces imposible distinguirlas en un registro común y corriente, por lo cual se ideó el ensayo Down Hole.

Mediante los golpes laterales a la viga se generan señales ricas en ondas de corte y aprovechando la posibilidad de polarizar la señal que tiene el sismógrafo empleado, es posible distinguir la onda de corte por su forma, frecuencia y amplitud así como por sus "picos" que son en un sentido cuando se golpea por un lado (hacia arriba o hacia abajo) y en el otro sentido cuando se golpea el otro lado.

Una vez conocidos los tiempos de llegada tanto de las ondas P como de las ondas S, se calcula su velocidad simplemente como  $V = d/t$  en donde  $d$  es el espacio y  $t$  el tiempo. El espacio usualmente se toma como el espesor de cada capa y el tiempo como la diferencia de lecturas en esa misma capa, o bien trazando líneas rectas  $d-t$  cuya pendiente es la velocidad. En la Fotografía 3.6 se presenta la organización de la prueba en campo.



Fotografía 3.6. Ejecución en terreno de ensayo Down Hole, Cali.



### 3.2.4.2 Resultados de la prueba

En la **Tabla 3.4** se presentan los sitios donde se realizó la prueba, así como la profundidad hasta la cual se interpretó el ensayo. Los datos y perfiles de velocidades de onda S y P se muestran en el Anexo 2.

Con base en los tiempos de llegada, los cálculos de velocidades se hicieron como se describe a continuación.

Con los tiempos de llegada de las ondas  $t_p$  y  $t_s$ , tiempo de ondas de compresión y tiempo de onda de corte respectivamente, se obtienen las velocidades que corresponden a la pendiente de la curva profundidad vs tiempo así:

$$V = \frac{d}{\Delta t}$$

Donde:

$V$  Velocidad en m/s

$d$  Espacio entre las medidas consideradas en metros

$\Delta t$  Diferencia de tiempo entre los dos puntos considerados en segundos

Los módulos para niveles muy bajos de deformación ( $10^{-6}\%$ ) son calculados con base en los pesos unitarios del perfil estratigráfico correspondiente. Finalmente, los parámetros dinámicos para cada estrato se obtienen mediante las siguientes expresiones:

Relación de Poisson	$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$
---------------------	--

Módulo de Corte	$G = \rho V_s^2$
-----------------	------------------

Módulo de Elasticidad	$E = 2G \cdot (1 + \nu)$
-----------------------	--------------------------

Módulo Bulk	$B_k = \frac{1}{3} \cdot \frac{E}{1 - 2\nu}$
-------------	--



202

Tabla 3.4. Relación de Pruebas de Down Hole (DH).

No	NOMBRE	PROFUNDIDAD DOWN HOLE (m)	CODIGO BDG
1	Velódromo	51	VELODP3
2	Panamericanas	48	PANAMP4
3	Centro de Salud H. Garcés	48	HGARCP5
4	Parque del Amor	38	PAMORP7
5	Parque Villa del Sur	50	PVSURP8
6	Planta de Puerto Mallarino	52	PMALLP10
7	INGEOMINAS	51	INGEOP12
8	Decepaz	25	DECEPP13
9	Valle del Lili	46	VLILIP14
10	Comfandi	23	COMFAP16
11	Pasoancho con Cr 80	40	PCR80P19
12	Vivero Municipal	38	VIVERP24
13	INEM	38	INEMP25
14	Floralia	38	FLORP26
15	Meléndez (Makro)	24	MELENP27
16	Colegio J. Camacho	51	CAMACP28
17	Vientos de Guadalupe	53	GUADAP30
18	Navarro	11	NAVARS20
	<b>TOTAL</b>	<b>725 metros</b>	<b>18 Pruebas</b>



## CAPITULO 4

### ENSAYOS DE LABORATORIO

Debido a que la mayor parte de los ensayos de laboratorio realizados en los estudios de suelos de Cali, corresponden a ensayos de clasificación y de resistencia no drenada, se realizó un plan de ensayos de laboratorio, orientado a la obtención de parámetros de compresibilidad y resistencia estática y dinámica. En general los ensayos se orientaron a los siguientes aspectos:

- Evaluar las características de expansión y compresibilidad de los suelos finos de Cali. De igual manera se pretende determinar la variación del esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_p$ ) en profundidad, con el fin de utilizar esté parámetro en los análisis no lineales de respuesta sísmica local, ya que el esfuerzo de preconsolidación es un indicativo del tamaño de la superficie de fluencia.
- Evaluar el comportamiento estático y dinámico de las arcillas, limos, arenas y gravas. Con los resultados de estas pruebas se pretende obtener parámetros geomecánicos, para modelar los efectos locales y el fenómeno de licuación bajo dos perspectivas: Posibles hundimientos del terreno y corrimiento lateral en cercanías al Jarillón sobre el río Cauca (lateral spreading).

En este orden de ideas, se recolectó el mayor número de muestras inalteradas para su análisis en laboratorio; la distribución de las muestras recolectadas por perforación se presentó anteriormente en la **Tabla 3.1**.

A manera de resumen en la **Tabla 4.1** se muestran el tipo y número de ensayos realizados por cada perforación. Para el manejo eficiente de los resultados se han incorporado a la BDG implementada por el proyecto. En el Anexo 3 se encuentran las tablas de resumen de parámetros geotécnicos, junto con los ensayos de consolidación, compresión simple, corte directo, triaxial CU y triaxial cíclico.

Un primer análisis de los resultados de laboratorio se muestra en las **Figuras 4.1 y 4.2**, en donde se observa la distribución de las muestras según su clasificación USGS, la correspondiente Carta de Plasticidad y las estadísticas de los parámetros mas importantes, de donde se pueden estimar algunas características generales de los depósitos de la ciudad de Cali.

#### 4.1 ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD

Con el fin de determinar las características de compresibilidad y/o expansión de los suelos finos encontrados en el subsuelo de la ciudad de Cali, se realizaron 141 ensayos edométricos, tendientes a evaluar el esfuerzo de preconsolidación, el índice de compresión, el índice de recompresión, así como la delimitación del espesor de la capa sobreconsolidada.

Un parámetro de especial interés es el esfuerzo de preconsolidación  $\sigma_p$ , que corresponde a la presión a la cual la rigidez de un suelo en un ensayo edométrico cae rápidamente, y el suelo sufre deformaciones irreversibles (plásticos). Para niveles de esfuerzos por debajo del esfuerzo de preconsolidación la respuesta del ensayo edométrico es esencialmente elástica.

Debido a la gran cantidad de información con que se cuenta, solamente se presentarán algunos casos de materiales típicos. Es importante resaltar que la información sobre ensayos edométricos es básicamente la de INGEOMINAS, ya que los estudios de suelos locales no realizan este tipo de ensayo, debido en parte a los elevados esfuerzos de preconsolidación de los suelos finos (Villafañe, 2005).

No	PERFORACIÓN	Humedades	Límites	Granulometría	Hidrometría	Peso Unitario	Gs	Consolidación	Comp Inconf.	Corte Directo	Triax CU	Triax Cíclico
1	Navarro A	33	15	13		15	8	8	7	1	2	11
2	Navarro B	14	5	5		7	4	4	4			
3	Velodromo	59	21	2		27	14	13	9		4	4
4	Canchas Panamericanas	57	15	5		17	12	10	2	1	2	3
5	Centro de Salud H. Garces	27	4	10		11		8	2		1	2
6	Parque de la Caña	2	1			2	2	2				2
7	Parque del Amor	32	10			16	4	9	5	1	2	
8	Parque Villa del Sur	39	18	7		21	7	16		1	4	3
9	Universidad Autónoma			1								
10	Planta de Puerto Mallarino	19	3	11		4	2				2	2
11	Parque el Vallado	10	2	3		7	3	2			2	3
12	Ingeominas	35	14	7		16	12	13		1	2	2
13	Decepaz	5	5	3		6	3	3	1		1	3
14	Valle del Lili	16	8	2		11	5	5	1			
15	Tanques	10	7	1		8	5	5	1	1		2
16	Comfandi	14	4	2		13	4	4	1	1	2	4
17	Club Campestre	4	1	3		2		1				
18	Aguas del Sur (Ciudad Real)	18	10	2		13	6	6		1	4	2
19	Pasoancho con Cr 80	27	22	4		18		7		1	2	4
20	Confenalco	3	2	1		2		2				
21	Palmeto Plaza	48	48	3		34	11	6	11	3	3	6
22	Instituto Tobías	31	29		3	13		4	1		1	4
23	Ptar	11	3	5		8		1	2		1	3
24	Vivero	10	12	6		4	4	4				3
25	Inem	27	18	6	4	13		4			2	4
26	Floralia	11	1	3		9	3	3			2	5
27	Melendez	15	7	4		9	6	5			2	3
28	Colegio Camacho	27	6	2		17	11	11	1	1	1	2
29	El Pilar	9	0	11		8	1	2			2	4
30	Guadalupe	35	10	5		26	9	12	1	10		3
	<b>SUBTOTALES</b>	<b>648</b>	<b>301</b>	<b>127</b>	<b>7</b>	<b>357</b>	<b>136</b>	<b>170</b>	<b>49</b>	<b>23</b>	<b>44</b>	<b>84</b>

Tabla 4.1. Relación de ensayos de laboratorio de suelos realizados por el Proyecto MZSCali.



Figura 4.1. Estadísticas generales de los resultados de Laboratorio de Suelos (1)

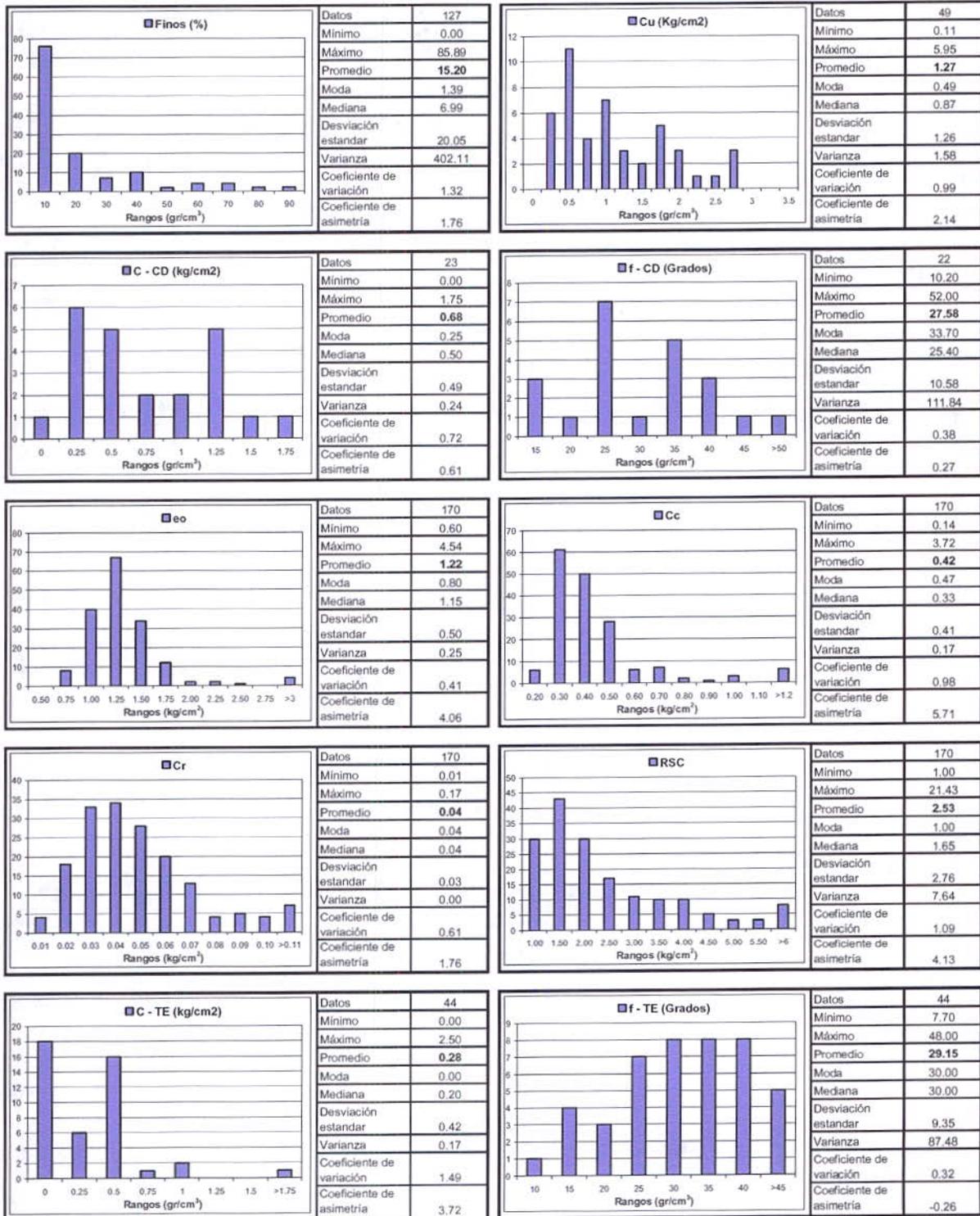


Figura 4.2. Estadísticas generales de los resultados de Laboratorio de Suelos (2)

En la **Figura 4.3** se observan curvas típicas de consolidación de algunos de los suelos de la ciudad de Cali, correspondientes a muestras ubicadas a profundidades que fluctúan entre 3.7 y 21.5 metros. De dicha figura se destacan los siguientes aspectos comportamentales:

- a) Los limos y arcillas de alta plasticidad (MH – CH), se caracterizan por presentar cambios volumétricos importantes cuando se descargan. De hecho, en la **Figura 4.3a, b, c, d y e**, se observa que la pendiente de la línea de descarga – recarga es mayor a la línea de compresión inicial ( $C_{dr} > C_r$ ). El anterior fenómeno no es fácil de explicar, pero puede ser debido a la presencia de una doble estructura del suelo. Este tema aunque es de gran importancia, para cimentaciones, se encuentra fuera del alcance del presente estudio.
- b) Los suelos arenosos por el contrario presentan el comportamiento típico, en el sentido de igualdad del índice de compresión y el de carga – descarga. (**Figura 4.3f**)
- c) En general, se encontró que el espesor de los limos y arcillas sobreconsolidadas, van hasta los 40 metros de profundidad. Esto se puede visualizar fácilmente en la **Figura 4.4**. Nótese que este material en superficie presenta relaciones de sobreconsolidación de hasta 15.
- d) En la zona norte de Cali, se detectaron arcillas y limos expansivos, los cuales ya habían sido reportados en una investigación adelantada por Villafañe (Villafañe, 2000). Los autores encuentran que la humedad antes de cubrir los lotes está próxima al límite plástico (25% al 35%). En el artículo los autores referencian los resultados de (Abduljawod, 1998), sobre la posible sobre-estimación en las presiones de expansión calculadas con el edómetro. Si bien el margen de error puede ser grande, no contamos con herramientas de laboratorio adicionales que nos permitan inferir la presión de expansión de forma más precisa. Finalmente, los autores desarrollan un método simplificado para el cálculo de expansiones – contracciones calculadas a partir de cambios de humedad en lugar de cambios de succión. Realmente el problema que se presenta es de mecánica de suelos no saturados, y es un problema que se requiere abordar mediante estudios específicos de detalle.
- e) Finalmente, en la **Figura 4.5** se presenta la variación de la presión de Expansión con el contenido de humedad, encontrándose que la humedad natural en los suelos expansivos fluctúa entre 20 y 45%, con una tendencia a disminuir en la medida en que el contenido de humedad se incrementa. Nótese que la presión de expansión fluctúa en 0.1 y 0.7 Kg/cm<sup>2</sup>, si asumimos un porcentaje de error del 100% (Abduljawod, 1998), nos darían presiones que fluctúan entre 0.05 y 1.4 Kg/cm<sup>2</sup>, los cuales no son despreciables.

## 4.2 RESISTENCIA AL CORTE

Con el fin de determinar los parámetros de resistencia del material fino (limos y arcillas), se realizaron ensayos no consolidados no drenados (UU), y consolidados no drenados midiendo presión de poros (CU). A continuación presentamos un resumen de las principales características de estos materiales.

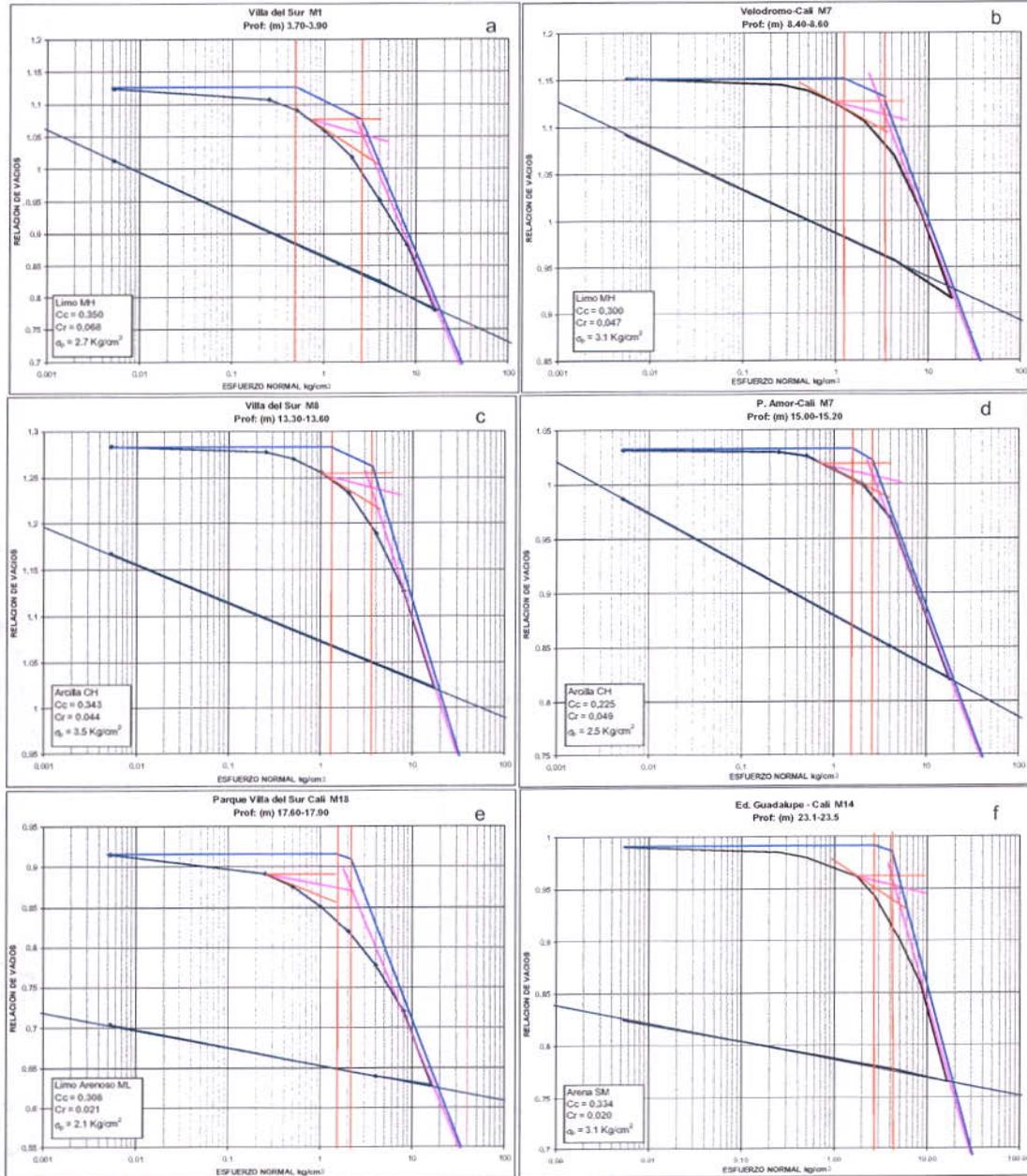


Figura 4.3. Curvas típicas de consolidación de Limos, Arcillas y Arenas

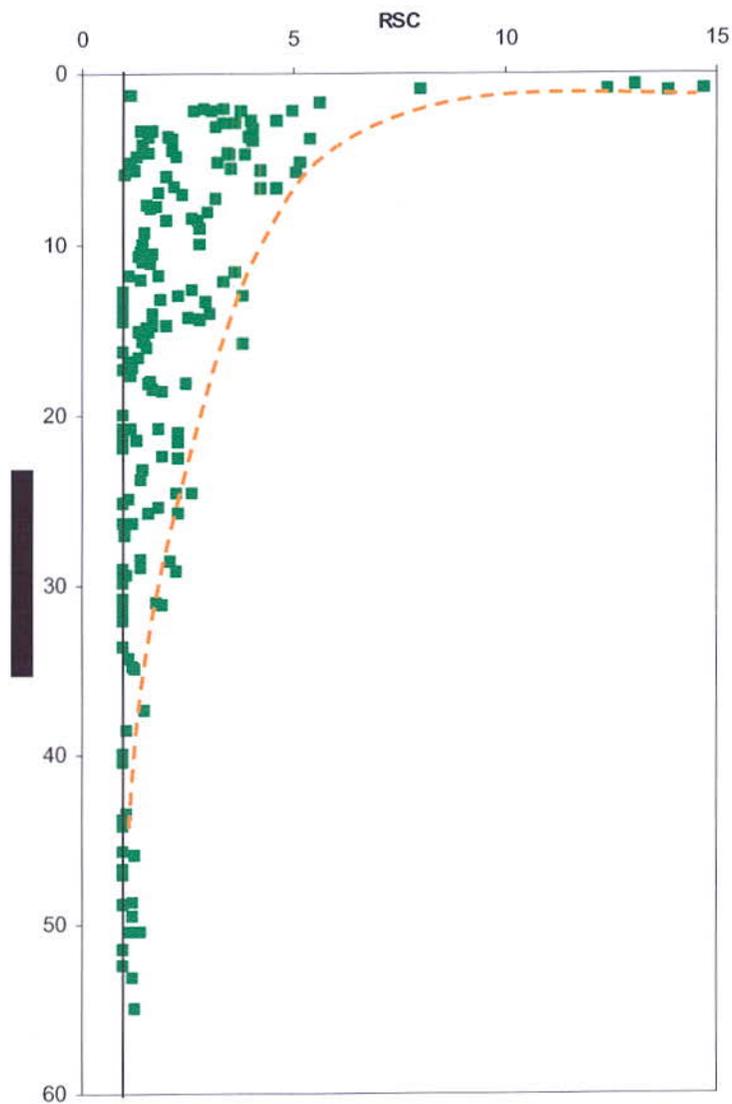
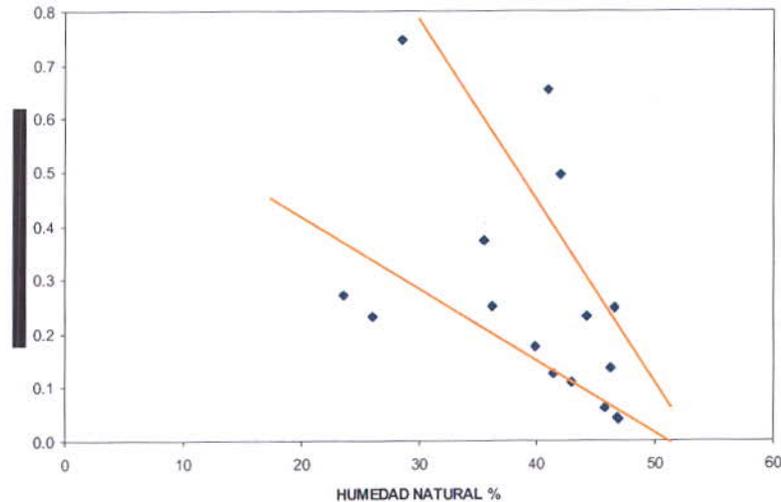


Figura 4.4. Variación de la RSC con la profundidad



**Figura 4.5.** Variación de la presión de expansión con el contenido de humedad

Mediante los ensayos no consolidados no drenados (UU), podemos determinar la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ), que es útil para evaluar la capacidad portante del terreno a corto plazo. La principal limitante de este ensayo, es que al no confinar la muestra, la presencia de pequeñas grietas en la muestra conduce a la obtención de resistencias inferiores a la real. Es importante destacar que este tipo de prueba, es la de uso común en los estudios de suelos llevados a cabo en la ciudad de Cali.

En la **Figura 4.6** se presentan algunas curvas típicas de los materiales donde se observan los siguientes aspectos comportamentales:

- Los materiales finos se caracterizan por su elevada resistencia. En dicha figura se observa que fluctúa entre 1.0 y 4.0 kg/cm<sup>2</sup>
- Los materiales en algunas ocasiones presentan un comportamiento dúctil (**Figura 4.6a, b y c**), mientras en otras, el comportamiento es frágil (**Figura 4.6d**).

### 4.3 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Estas pruebas se realizan con el fin de obtener los parámetros efectivos ( $c'$ ,  $\phi$ ). Para ello, se consolidaban las muestras a presiones similares a las existentes en campo, para posteriormente llevarlas a la falla. Con el fin de garantizar que el ensayo fuera drenado, la velocidad de aplicación fue muy lenta de tal manera que la duración para un punto fue del orden de 24 horas.

En la **Figura 4.7** se ilustran las envolventes de resistencia pico y residual para muestras provenientes de las perforaciones en H. Garcés y Palmetto Plaza. En términos generales se observa que el material presenta un ángulo de fricción que fluctúa entre 21° y 26°, y el intercepto de cohesión varía entre 0.1 y 0.3 Kg/cm<sup>2</sup>.

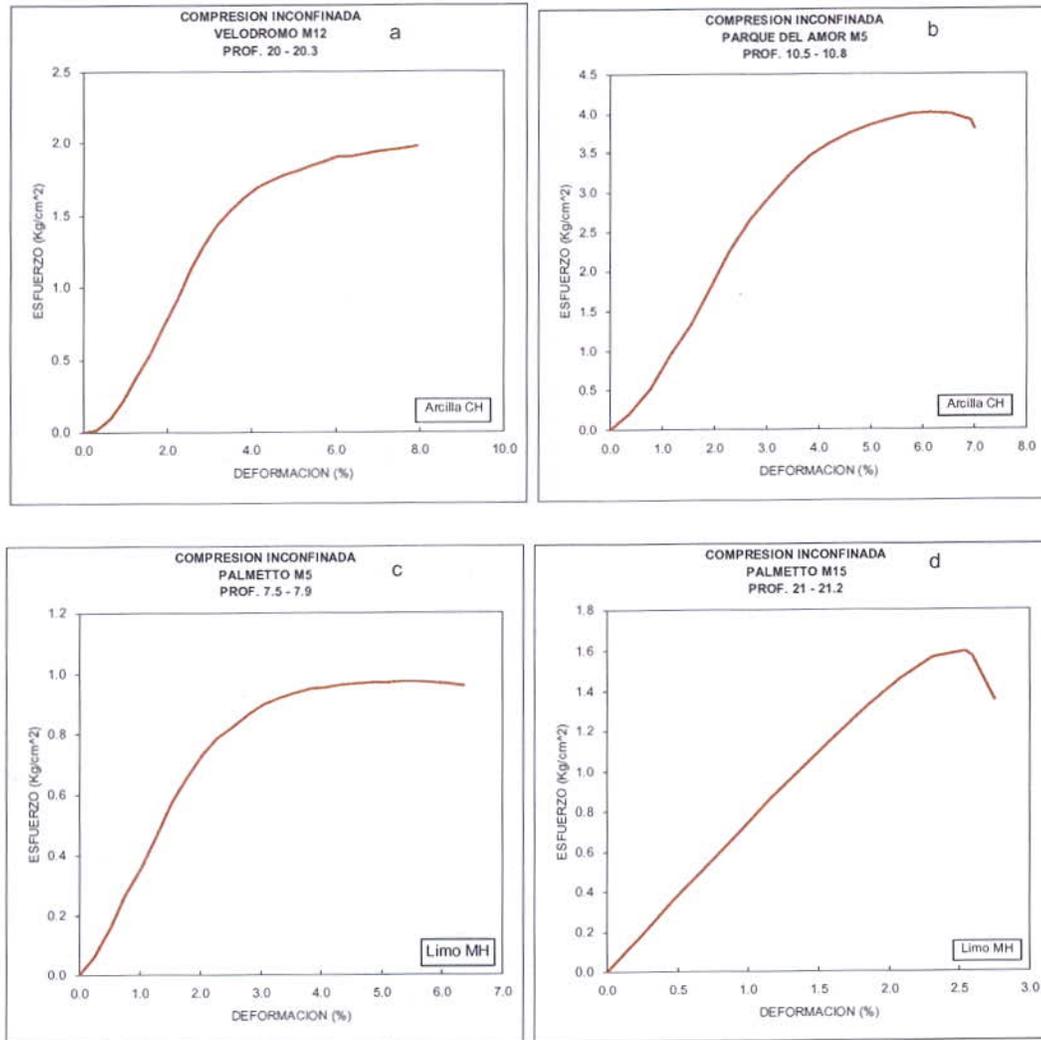


Figura 4.6. Compresiones inconfiadas de Arcillas y Limos

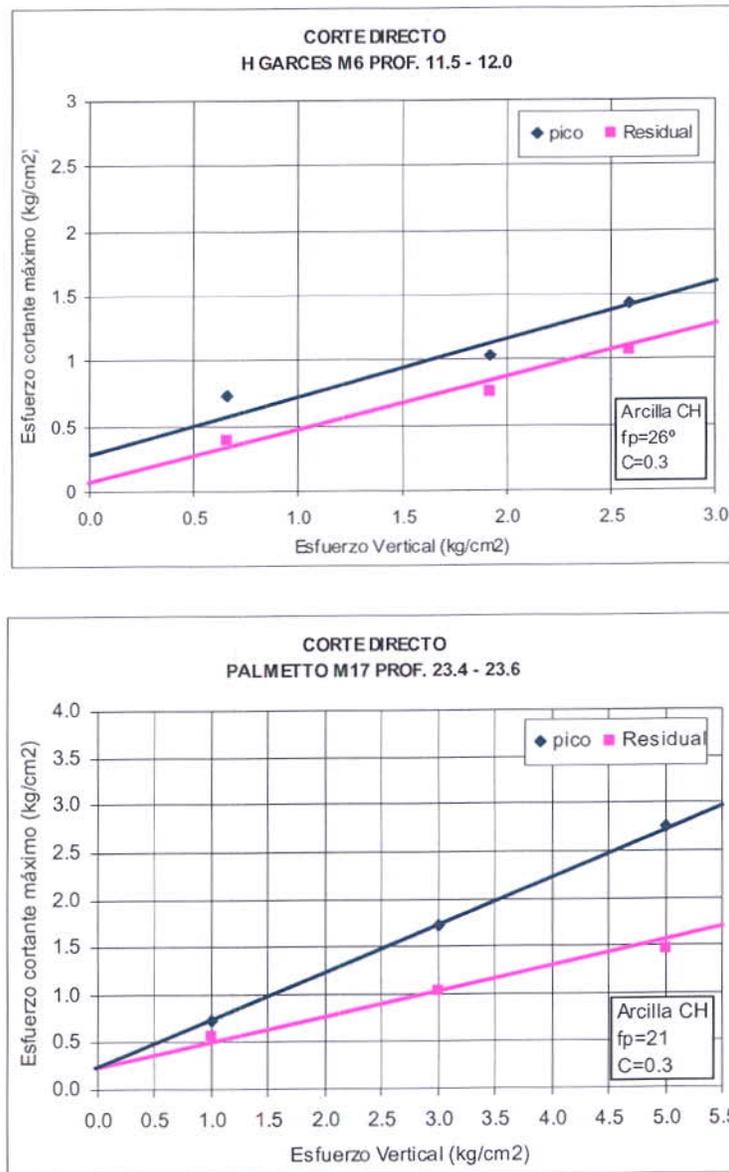
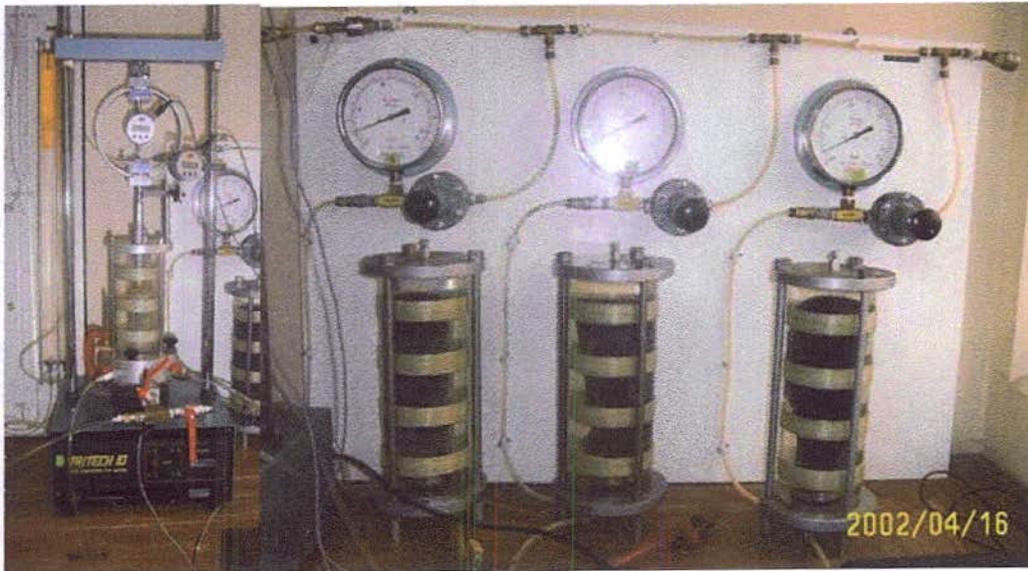


Figura 4.7. Cortes Directos de Arcillas

#### 4.4 ENSAYOS CONSOLIDADOS NO DRENADOS CU

Este tipo de prueba corresponde a ensayos triaxiales estáticos con medición de presión de poros (Fotografía 4.1). Para llevar a cabo el ensayo las muestras se consolidan a presiones similares a las existentes en el terreno y una vez consolidadas las muestras se fallan en condición no drenada; en general la mayor parte de los ensayos son de carga controlada, sin embargo para materiales que presentaban un comportamiento de ablandamiento por deformación se requirió cambiar a ensayo de deformación controlada.



**Fotografía 4.1.** Cámara Triaxial y sistema de aplicación de presión (Laboratorio de Suelos - INGEOMINAS)

En las **Figuras 4.8 a 4.10** se ilustran curvas típicas de esfuerzo-deformación-axial (a), exceso de presión de poros - deformación axial (b) y trayectoria de esfuerzos (c). De las anteriores figuras se destacan los siguientes aspectos comportamentales:

El limo del Velódromo es un material muy duro, que se caracteriza por ser muy rígido y resistente; en la **Figura 4.8b y c** se puede apreciar que el material es de una rigidez tal, que el incremento de presión de poros es muy pequeño y por lo tanto la trayectoria de esfuerzos es prácticamente una recta, hasta llegar a la envolvente de resistencia.

La arcilla de Villa del Sur, se caracteriza por un comportamiento dilatante, este fenómeno se visualiza claramente en la **Figura 4.9b**, donde inicialmente se presenta un incremento en el exceso de presión de poros y posteriormente esta empieza a disminuir. De igual manera, la **Figura 4.9c** muestra como la trayectoria de esfuerzos tiende a la derecha. Nótese que el limo y la arcilla presentan valores de  $\phi$  que fluctúan entre  $18^\circ$  y  $20^\circ$ .

Finalmente en la **Figura 4.10c**, se ilustra el comportamiento típico de una arena densa, ubicada en el Parque Villa del Sur. Nótese que la arena presenta un ángulo de fricción relativamente alto ( $\phi=34^\circ$ ), y que la presión de poros inicialmente se incrementa para posteriormente decaer por efecto de la dilatación del material.

## 4.5 ENSAYOS TRIAXIALES DINÁMICOS

### 4.5.1 Suelos arcillosos y limosos

Como se comentó anteriormente, el material arcilloso y limoso se caracteriza por su alta rigidez y resistencia que por supuesto lleva a la necesidad de aplicar esfuerzos desviadores importantes, con el fin de obtener las respectivas curvas esfuerzo-deformación. Esto de cierta manera se debe a los elevados esfuerzos de preconsolidación que posee el suelo, que hacen

que para niveles de esfuerzo inferiores al esfuerzo de preconsolidación el material se comporte elásticamente y no disipe energía.

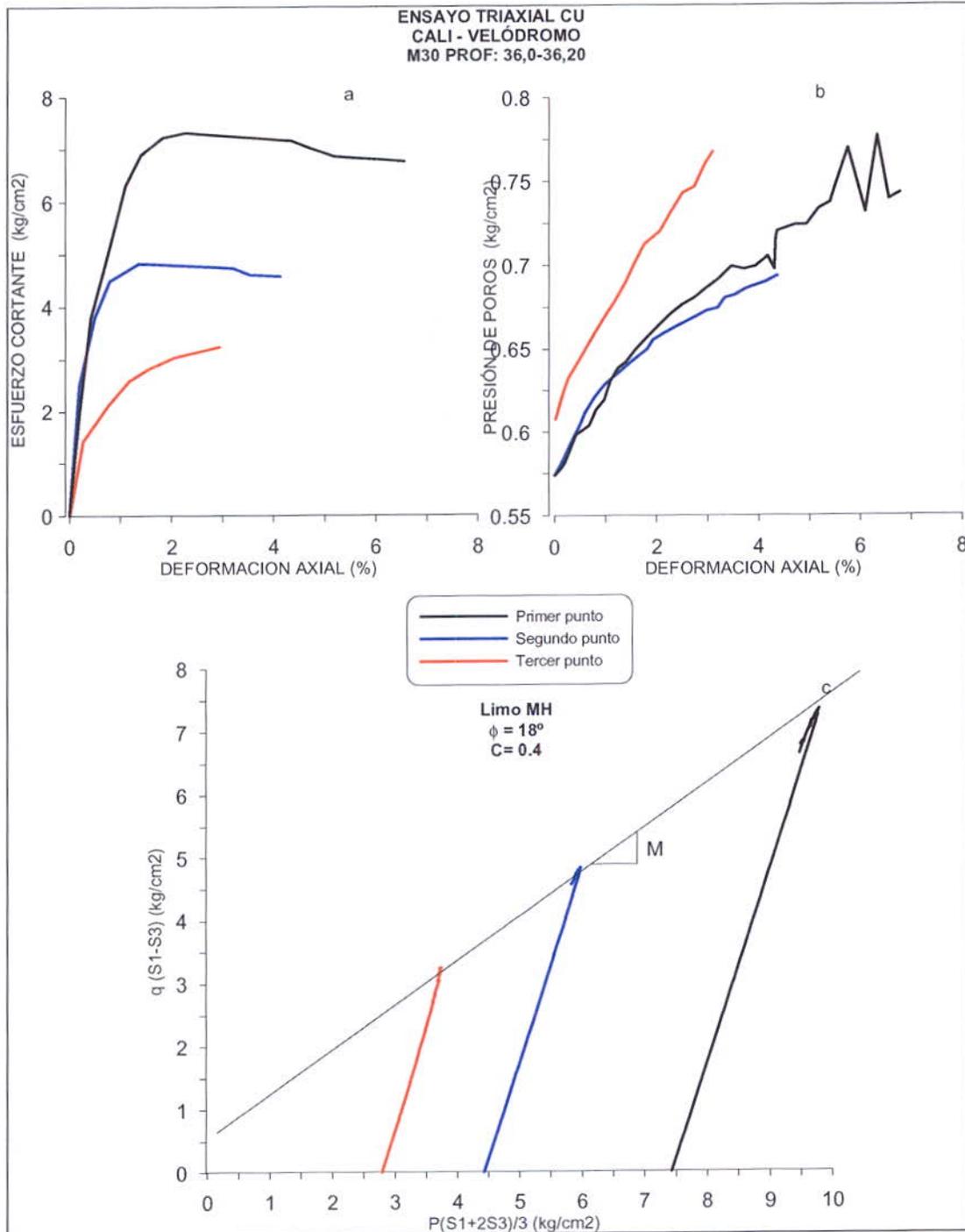


Figura 4.8. Triaxial Consolidado No Drenado del Limo de Velódromo

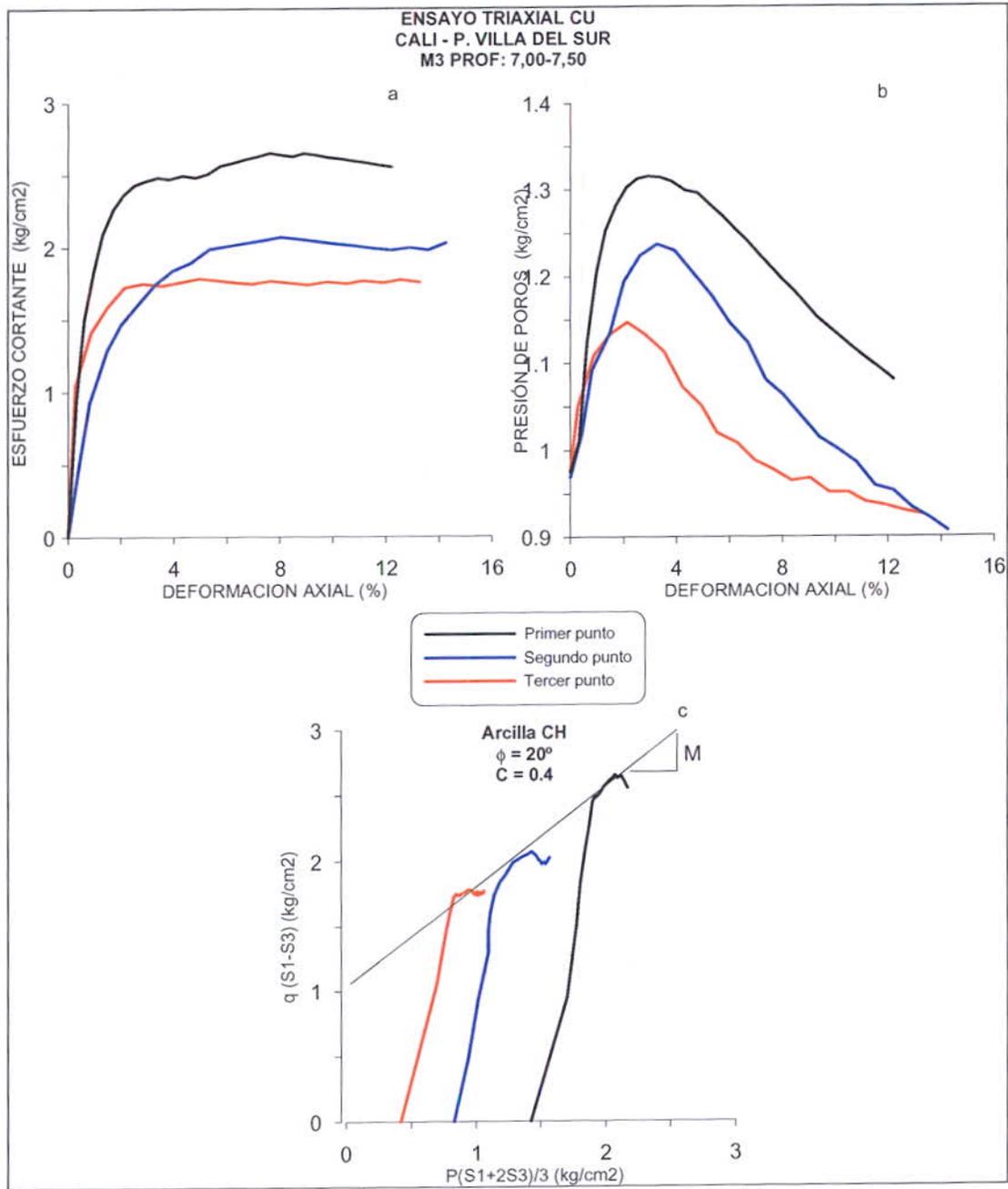
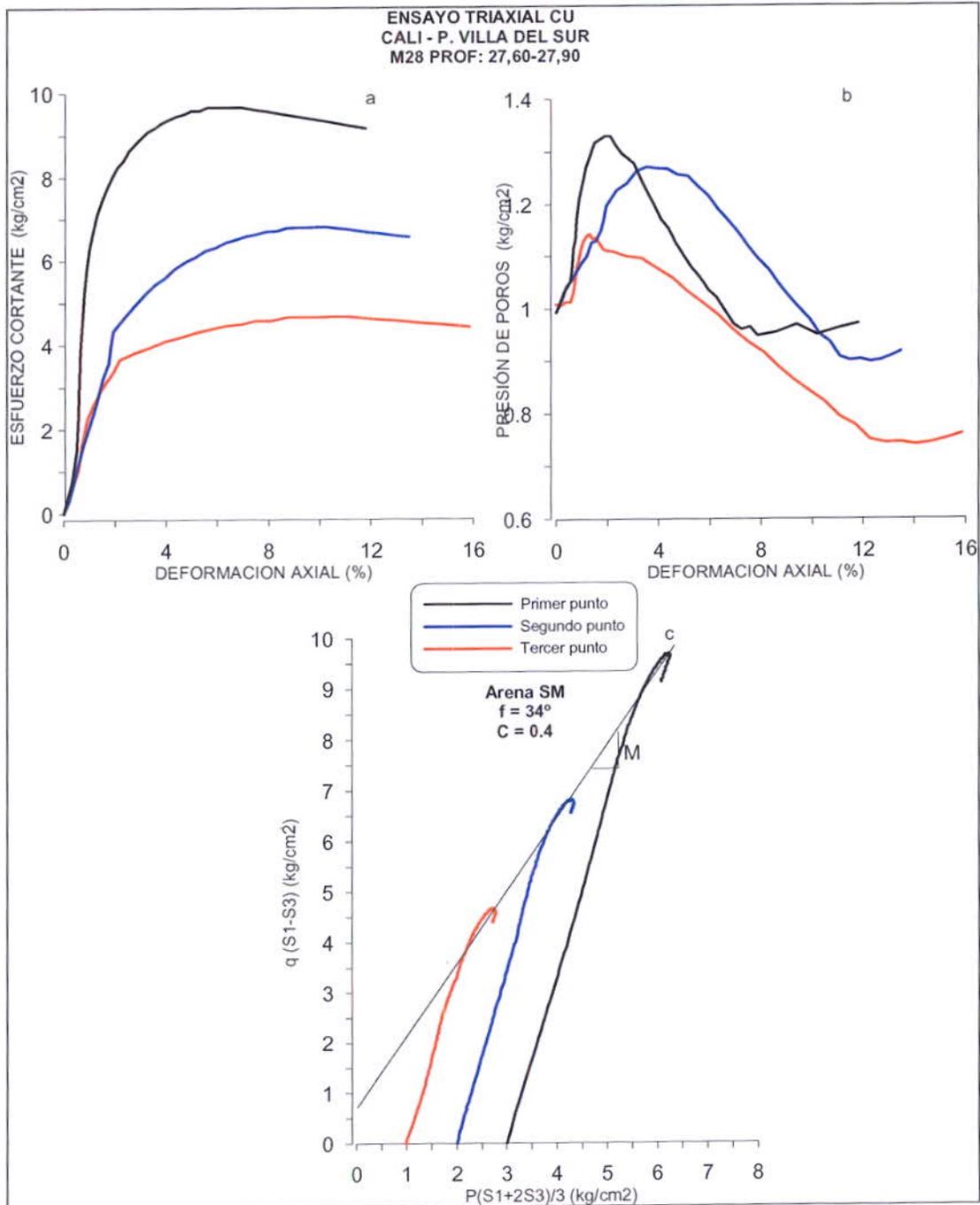
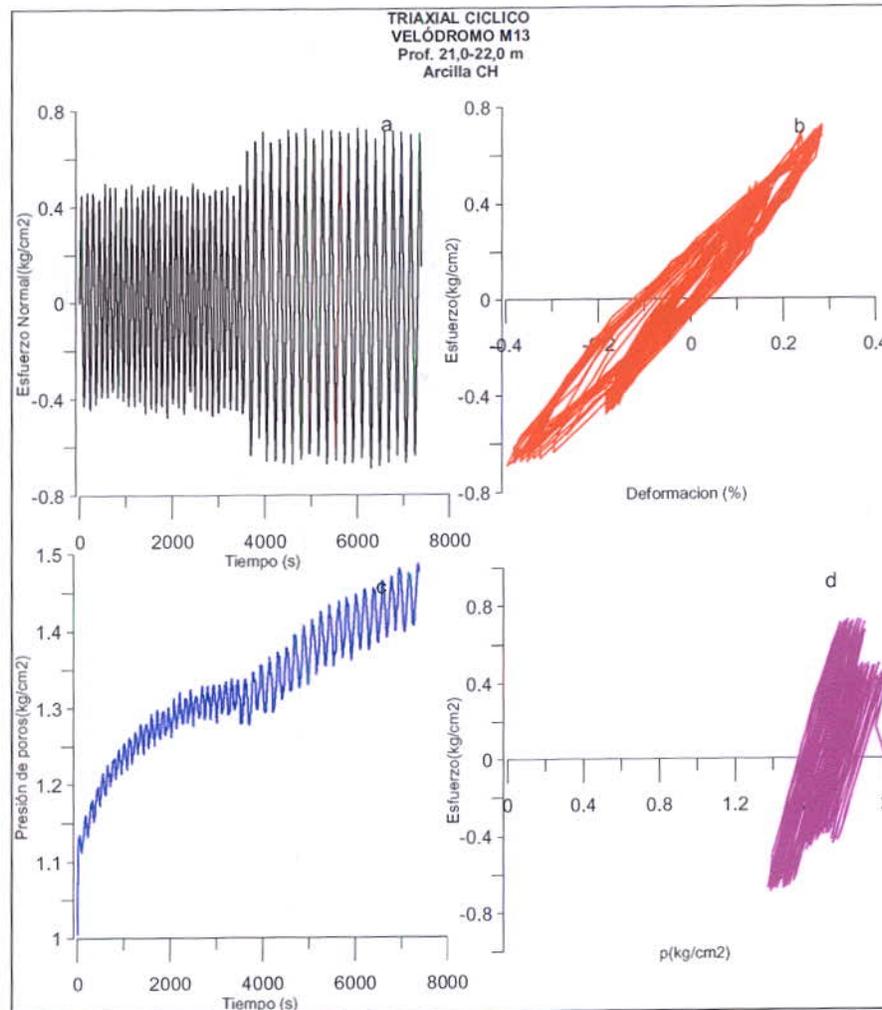


Figura 4.9. Triaxial Consolidado No Drenado de la Arcilla de Villa del Sur



**Figura 4.10.** Triaxial Consolidado No Drenado de la Arena de Villa del Sur

En la **Figura 4.11b**, se ilustra el comportamiento típico de una arcilla sobreconsolidada (CH) ubicada a una profundidad de 21 metros. El ensayo es de carga controlada, pero debido a que el nivel de deformaciones era muy pequeño fue necesario incrementar el esfuerzo desviador de 0.4 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 4.11.** Triaxial Cíclico de la Arcilla del Velódromo

La trayectoria de esfuerzos se encuentra en la **Figura 4.11d**, se observa que la trayectoria de esfuerzos se encontró muy alejada de la línea de estado crítico; de igual manera debido a la carga periódica, se produce un incremento en presión de poros de apenas 0.5 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.5.2 Suelos Arenosos

Este material a diferencia del anterior se caracteriza por la generación de presiones de poros importantes durante la aplicación de cargas periódicas. En la **Figura 4.12** se observa el comportamiento típico de este material, al cual se incremento el esfuerzo desviador con el fin de acelerar la falla. Este tema se retornara posteriormente en el estudio de licuación, donde

se tratará de reproducir las curvas esfuerzo-deformación y exceso de presión de poros, mediando un modelo constitutivo elastoplástico.

#### 4.5.3 Suelos Gravosos

Debido a la imposibilidad de ejecutar sobre estos materiales este tipo de pruebas en el país, fue necesario realizar los ensayos triaxiales en la Universidad de San Juan (Argentina). En la Fotografía 4.2 se ilustra el triaxial utilizado, el cual consta de una cámara de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, la muestra al igual que las anteriores fueron sometidas a presiones de consolidación similares a las existentes en campo.

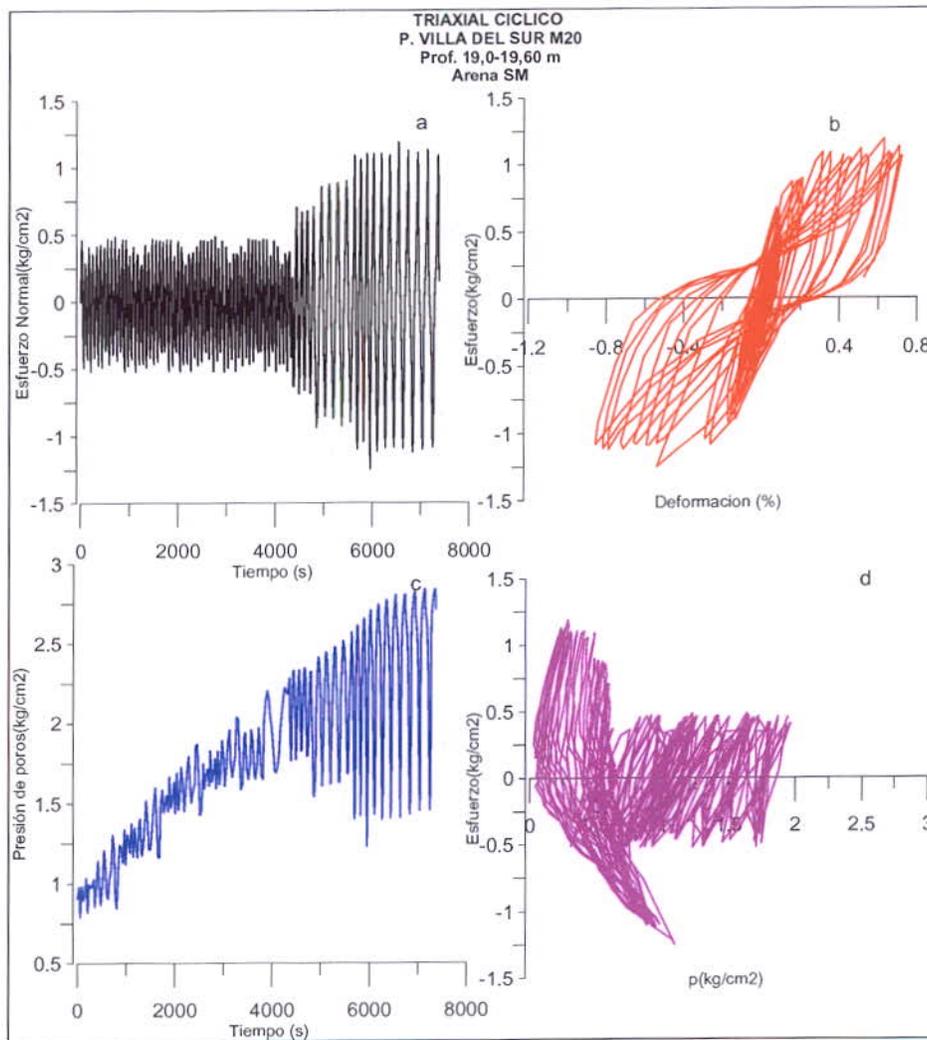
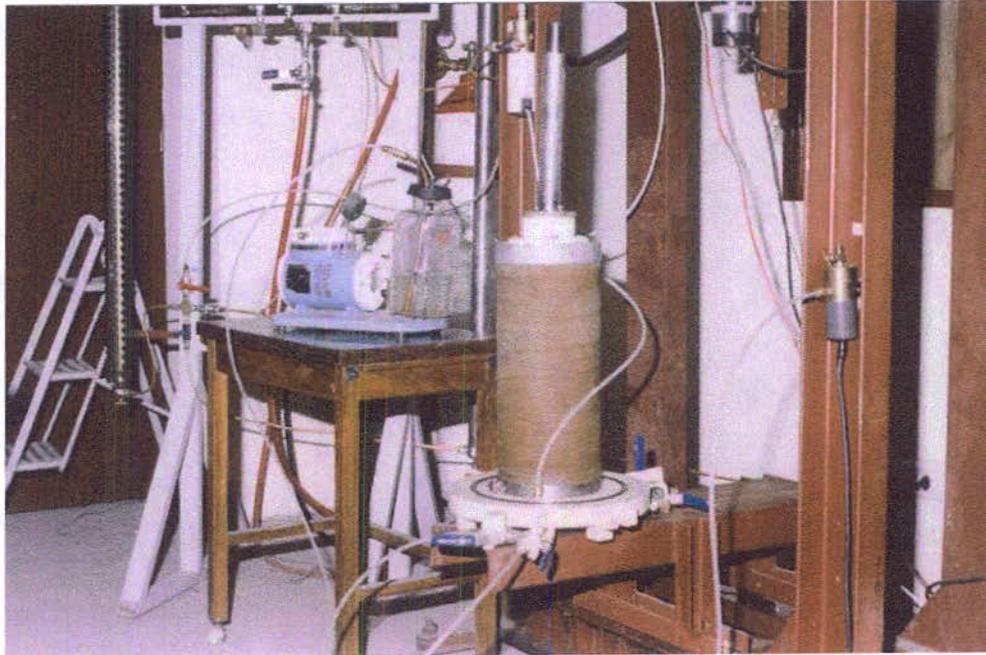


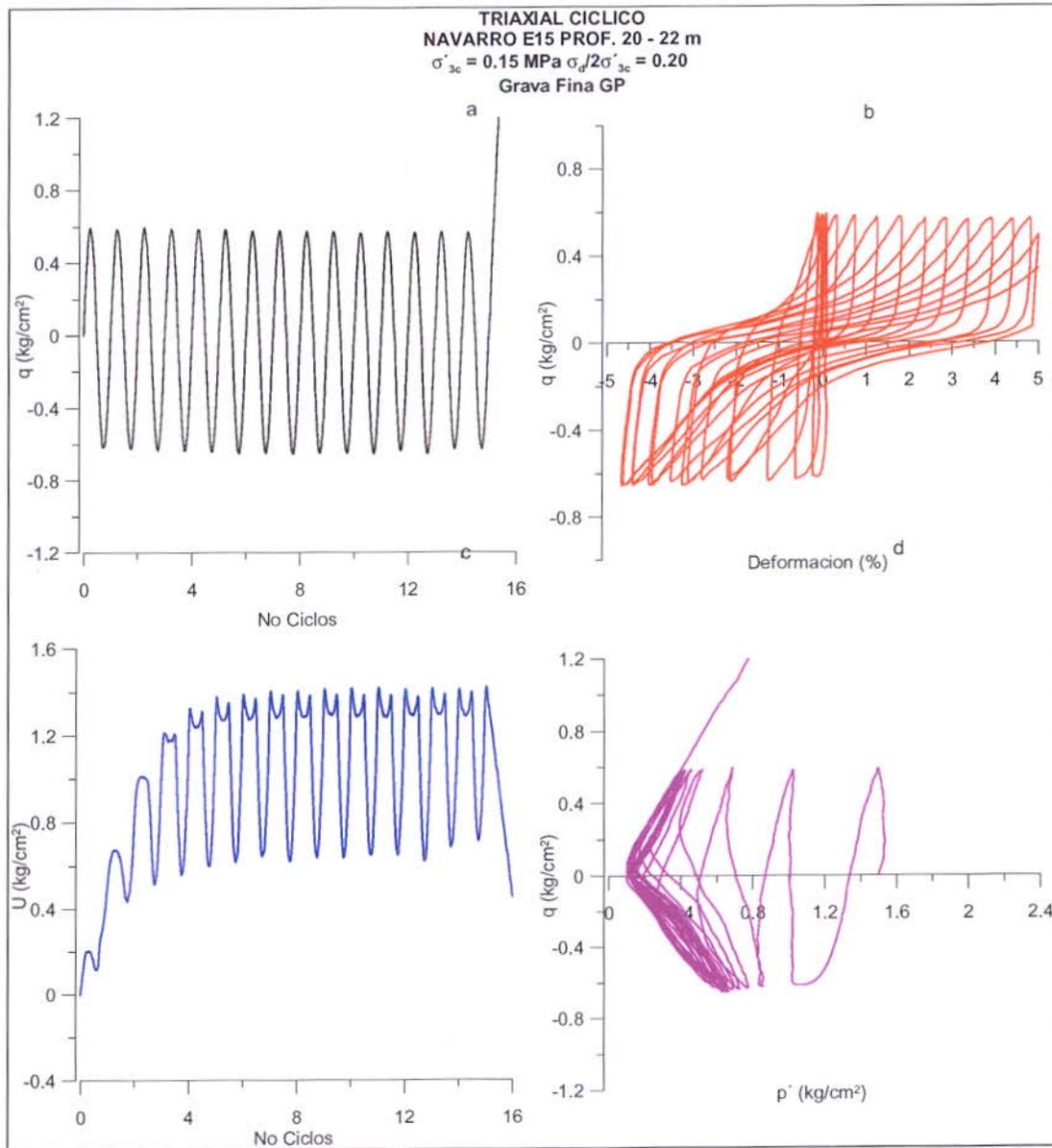
Figura 4.12. Triaxial Cíclico de la Arena de Villa del Sur



**Fotografía 4.2.** Cámara Triaxial Cíclica para materiales Granulares, Universidad de San Juan, Argentina.

Un ensayo típico de carga controlada sobre la grava fina de Navarro se ilustra en al **Figura 4.13**, encontrándose que es susceptible de licuarse ante cargas dinámicas. Nótese que la grava se consolida a  $15 \text{ t/m}^2$  y en 6 ciclos se licua. De igual manera se observa como la presión de poros va paulatinamente incrementándose hasta hacerse igual a la presión de consolidación.

Finalmente es importante comparar el comportamiento de la grava de Navarro, con los resultados experimentales obtenidos en otras partes del mundo. Para ello, se construyó la curva  $\sigma_d / 2\sigma'_c$  Vs No Ciclos para las arenas aluviales de la ciudad de Cali y la grava fina, la cual se ilustra en la **Figura 4.14**. Estos resultados se compararon con la grava de Oroville, arena de Sacramento y arena de Tumaco, encontrándose que el comportamiento de la grava fina de Navarro es muy similar a la arena Sacramento (por lo menos en la forma) y las arenas aluviales de Cali se encuentran entre el rango de las arenas de sacramento y es muy similar a la de Tumaco. Las anteriores curvas son valiosas para evaluar el potencial de licuación por métodos empíricos.



**Figura 4.13.** Triaxial Cíclico de la Gravilla de Navarro

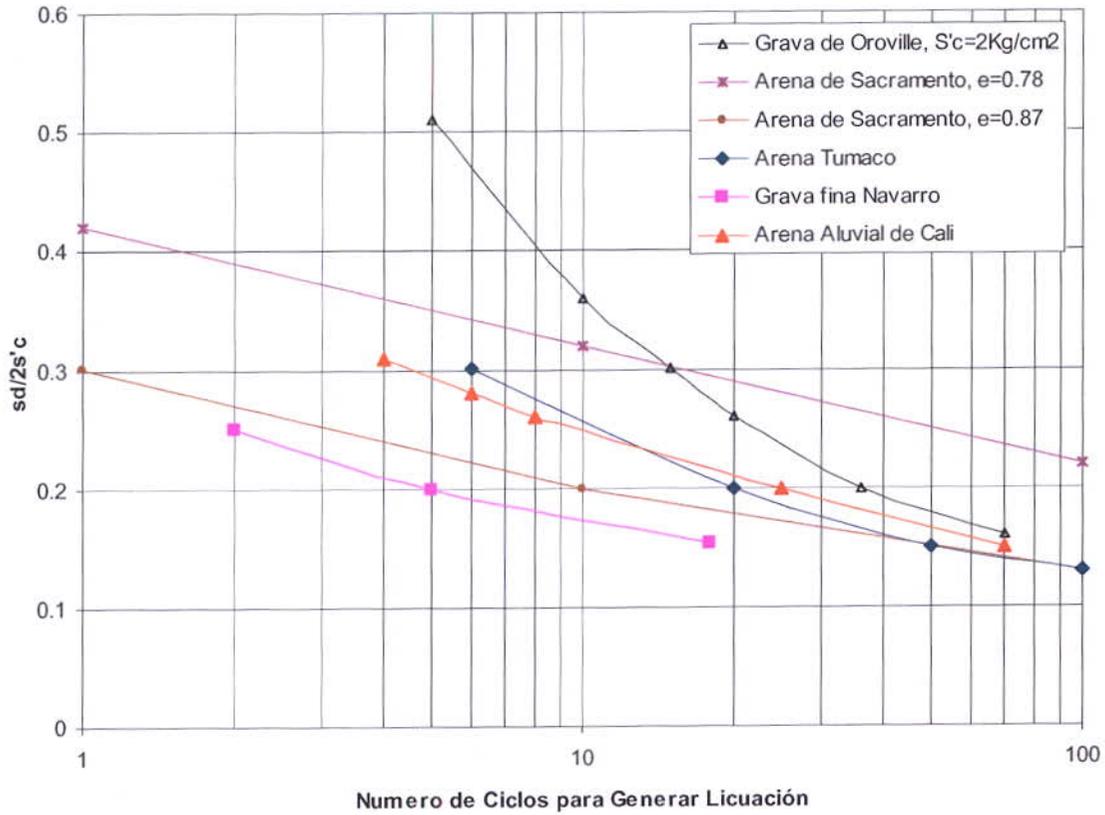


Figura 4.14. Curvas de resistencia cíclica de materiales granulares de la Ciudad de Cali, entre otras.



---

## CAPITULO 5

---

### PERFILES Y SECCIONES GEOTÉCNICAS

#### 5.1 PERFILES GEOTÉCNICOS

Partiendo de la anterior información, fue posible realizar 30 perfiles geotécnicos que oscilan entre 4 m y 100 m, estos perfiles geotécnicos de los sitios de exploración reúnen la información recopilada en campo, como las descripciones geotécnica y litológica de los materiales, homologadas y ajustadas con los ensayos de clasificación, además de los registros Vs de Down Hole y los resultados de laboratorio realizados. Dichos perfiles geotécnicos se presentan en el Anexo 4.

A continuación se explican los aspectos que se tuvieron en cuenta para elaborar los perfiles geotécnicos de los sitios de exploración.

##### 5.1.1 Columnas Estratigráficas

La descripción de campo se homologó para cada estrato utilizando cada uno de los siete descriptores siguientes:

- Tipo de suelo: Bloques; Bolos; Gravas (Gruesa, Media, Fina); Arenas (Gruesa, Media, Fina); Limos y Arcillas. Además de las posibles combinaciones de estos materiales.
- Color: Color predominante, vetas, trazas y nódulos.
- Consistencia y compacidad: Para Arcillas y Limos: Muy blando, Blando, Duro, Muy Duro y Rígido. Para Granulares: Muy suelto, Suelto, Medio suelto, Compacto y Muy compacto.
- Humedad: Seco, medio húmedo, húmedo, muy húmedo y empapado.
- Estructura: Figurado o Agrietado
- Origen: Aluvial, Coluvial, Relleno, otros.
- Otras características: observaciones particulares del material.

De la descripción realizada en campo se destaca en general la presencia de suelos finos de varios metros de espesor en la parte superior (limos, arcillas y turbas), disminuyendo su espesor en la medida que nos acercamos al río Cauca. Subyaciendo la anterior capa, se encuentran intercalaciones de arenas y gravas susceptibles de sufrir licuación. En las Fotografías 5.1 a 5.6 se ilustran los materiales típicos encontrados, de donde se puede apreciar el color, textura y tamaño de grano aproximado.



**Fotografía 5.1.** Perforación PTAR, muestra de arena media a gruesa gris (18 m) y testigo de limo arcilloso verde oliva muy duro y frágil (49 m).



**Fotografía 5.2.** Perforación INEM, testigos de arcilla marrón blanda (9 m), arena fina a media limosa marrón ocre (20 m), grava gruesa verdosa (24 m), limo arcilloso verde oliva muy duro y frágil (27.8 m).



**Fotografía 5.3.** Perforación PALMETTO PLAZA, testigos de materia orgánica negra compuesta por madera y hojas (85.6 m), arcilla café oscuro blanda con algo de materia orgánica (95.2 m), limo arcilloso café oscuro dura (100.8 m).



**Fotografía 5.4.** Perforación INSTITUTO TOBIAS, testigos de materia orgánica negra muy dura conformada por madera y hojas (32 m), limo verde grisáceo oscuro muy duro y deleznable (40.8 m).



**Fotografía 5.5.** Perforación VIVERO, testigos de limo arcilloso marrón duro (7.9 m), grava gruesa verdosa y marrón subredondeada (16.5 m), grava media a gruesa verdosa subredondeada (36 m) y limo arcilloso verde oliva duro y frágil (50 m).



**Fotografía 5.6.** Perforación GUADALUPE, testigos de materia orgánica compuesta por madera y hojas de consistencia dura (47.6 m), arena limosa gris verdosa medianamente compacta (43.1 m) y limo orgánico gris blando (49 m).

### 5.1.2 Materiales Típicos

Una vez realizados estos perfiles geotécnicos, se agruparon los suelos de comportamiento geomecánico similar en materiales típicos, con base en sus propiedades índice, de compresibilidad y resistencia. Esto se realiza con el fin de poder caracterizarlos de una manera más general y de alguna forma simplificar los perfiles para el posterior análisis de respuesta sísmica local.

De esta forma, se establecieron los siguientes materiales típicos en los sitios de exploración, agrupados por tipo de suelo - Arcillas, Limos, Arenas, Gravas y Materia Orgánica - (ver **Tablas 5.1 a 5.5**). Nótese que en la primera columna se encuentra el código asignado a cada material, el cual se encuentra en los perfiles geotécnicos.

**Tabla 5.1. Materiales Típicos Arcillosos**

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
C1	CH MH	Arcilla limosa y limo arcilloso, colores café, amarillo y gris, consistencia firme, muy sobreconsolidada, con presencia de materia orgánica, material superficial.
C2	CH	Arcilla limosa, colores amarillo, habano y rojizo, consistencia firme, sobreconsolidado, con presencia de gravas esporádicas
C3	CH	Arcilla limosa, colores café y gris, consistencia firme, con presencia de óxido, fragmentos de grava y materia orgánica.
C4	CH	Arcilla limosa, color azul con vetas habanas, consistencia muy firme.
C5	CH	Arcilla limosa, colores rojizo, amarillo y habano, consistencia firme.
C6	CH	Arcilla, colores gris verdosa marrón, consistencia firme.

**Tabla 5.2. Materiales Típicos Limosos**

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
M1	ML CL	Limo arenoso y Arcilla arenosa, colores gris verdoso y amarillento rojizo, consistencia blando y deleznable.
M2	MH CH	Limo arcilloso y Arcilla limosa, colores gris verdoso y verde oliva con tintes marrones amarillentos, consistencia firme a rígido.
M3	MH	Limo arcilloso, colores amarillento y rojizo por oxidación, consistencia firme, con presencia de gravas y materia orgánica.
M4	MH	Limo arcillo arenoso, colores amarillento rojizo y marrón, consistencia muy firme, con presencia de gravas meteorizadas.
M5	MH	Limo arcilloso, colores gris y café verdoso, consistencia blanda, con alto contenido de materia orgánica.

**Tabla 5.3. Materiales Típicos Arenosos**

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
S1	SM	Arena fina y Arena limosa, color gris oscuro, angular a subangular. Material de la Llanura Aluvial
S2	SP SM	Arena media a gruesa, color gris oscuro, angular a subangular. Material de la Llanura Aluvial
S3	SM	Arena fina limosa, colores amarillo y marrón, subangular a subredondeada. Material del Abanico Aluvial
S4	SM	Arena fina, color gris claro y blanca. Material Volcánico

**Tabla 5.4. Materiales Típicos Gravosos**

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
G1	GP	Grava fina, color gris, angular. Material de la Llanura Aluvial
G2	GP	Grava gruesa y cantos, colores verdoso y amarillentos, subangulares a subredondeados. Material del Abanico Aluvial de Pance.
G3	GP GM	Grava gruesa y cantos, colores amarillentos y verdosos, subredondeados a redondeados. Material de Abanico Aluvial.
G4	GP GM, GC	Grava gruesa, cantos y bloques, colores amarillentos y verdosos, angulares a subredondeados. Material de Flujos Fluviotorenciales.

**Tabla 5.5. Materiales Típicos Orgánicos**

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
P1	Pt	Materia orgánica, colores negro y café oscuro, consistencia muy firme, conformada principalmente por restos de vegetación.
P2	MH	Limo orgánico, colores gris oscuro y negro, consistencia firme, densidad baja, con bastante materia orgánica.

### 5.1.3 Caracterización Geomecánica

Las propiedades índices y parámetros geomecánicos de cada uno de los materiales típicos encontrados, se ha determinado a partir de análisis estadístico de los resultados de los ensayos de laboratorio. Estos análisis se representan por histogramas acompañados de sus estadísticas por cada parámetro estudiado. A continuación se presentan estos análisis y los valores promedio de cada material.

### 5.1.3.1 Materiales arcillosos

En las Figuras 5.1 y 5.2 se presentan la variación de las propiedades de los suelos arcillosos muestreados y la Tabla 5.6 resume los valores promedio de cada uno de los materiales arcillosos.

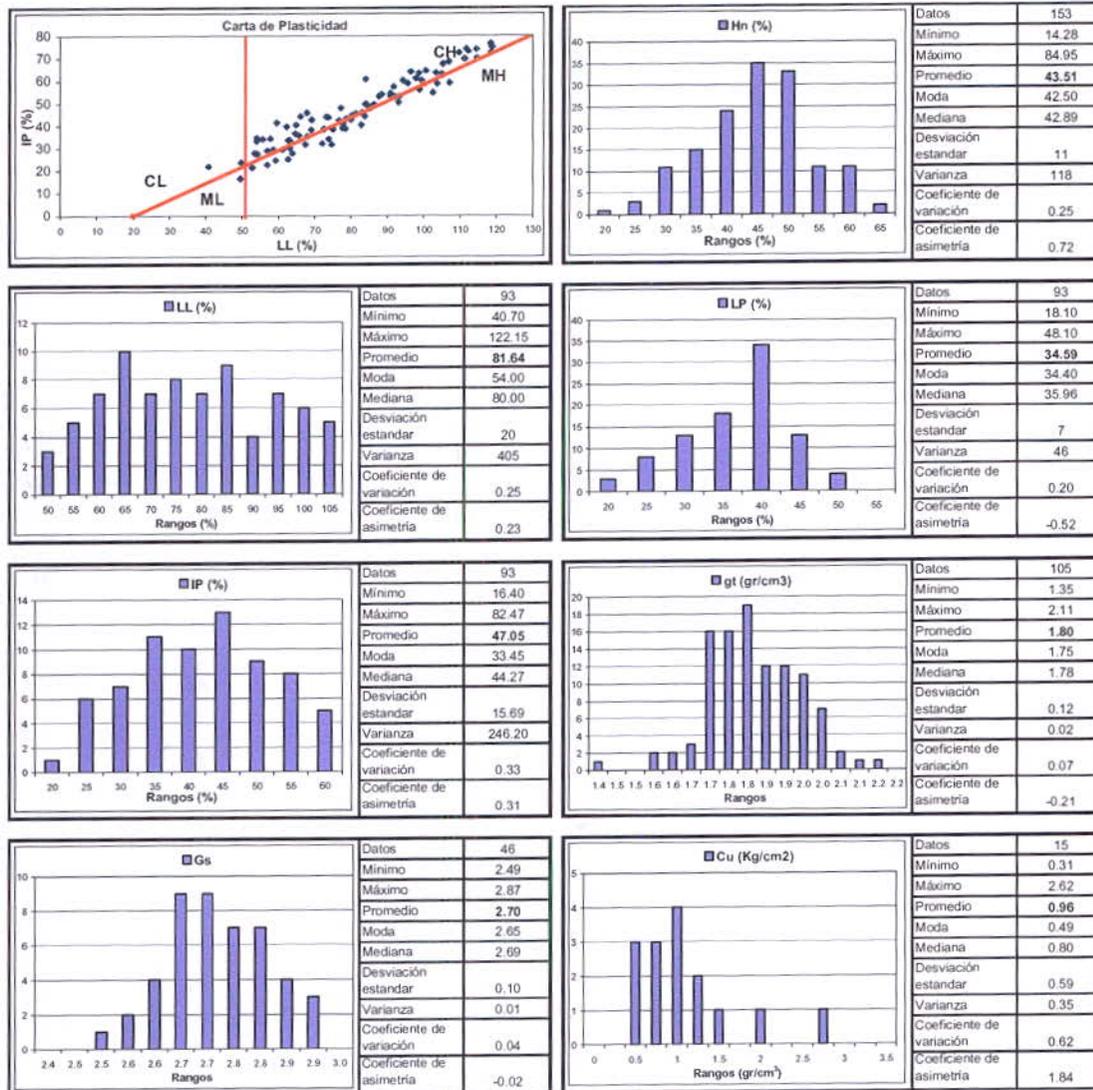


Figura 5.1. Estadísticas de los materiales arcillosos (1)

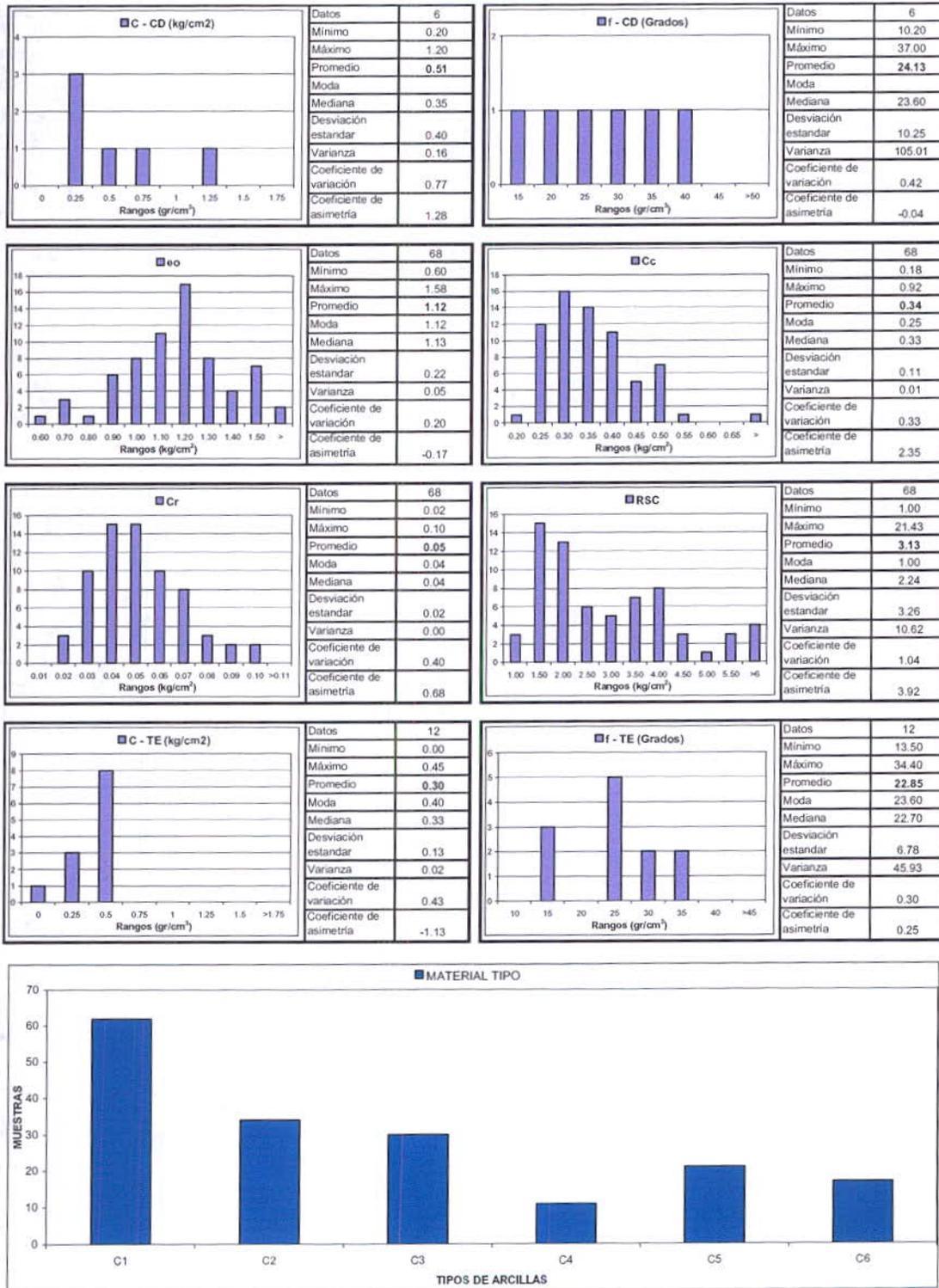


Figura 5.2. Estadísticas de los materiales arcillosos (2)

**Tabla 5.6.** Propiedades promedio de los materiales arcillosos

Parámetro	TODAS		C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.								
Hn (%)	153	43.51	57	40.75	25	40.88	26	46.30	10	48.51	20	45.60	16	47.53
LL (%)	93	81.64	41	74.03	15	72.49	6	77.48	7	104.74	12	93.65	13	93.69
LP (%)	93	34.59	41	34.22	15	30.38	6	31.97	7	39.11	12	38.82	13	36.82
IP (%)	93	47.05	41	39.81	15	42.11	6	45.52	7	65.63	12	54.83	13	56.88
$\gamma_i$ (gr/cm <sup>3</sup> )	105	1.80	49	1.82	19	1.83	10	1.78	7	1.71	12	1.75	9	1.75
G <sub>s</sub>	46	2.70	19	2.71	10	2.71	5	2.59	5	2.69	5	2.76	2	2.61
Cu (Kg/cm <sup>2</sup> )	15	0.96	7	0.75			3	1.67			5	0.81		
C <sub>CD</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	6	0.51			1	0.22	1	1.20	2	0.33	1	0.75	1	0.25
$\phi_{CD}$ (Grados)	6	24.13			1	26.60	1	37.00	2	25.20	1	20.60	1	10.20
e <sub>0</sub>	68	1.12	35	1.12	14	1.04	6	1.14	4	1.33	5	1.28	5	1.00
C <sub>c</sub>	68	0.337	35	0.314	14	0.328	6	0.349	4	0.530	5	0.337	5	0.348
C <sub>r</sub>	68	0.047	35	0.047	14	0.052	6	0.035	4	0.057	5	0.040	5	0.046
RSC	68	3.13	35	4.29	14	2.16	6	1.29	4	2.10	5	1.60	5	2.29
C <sub>TE</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	12	0.30	4	0.38	2	0.40	1	0.00	1	0.30	2	0.30	2	0.20
$\phi_{TE}$ (Grados)	12	22.85	4	27.03	2	21.15	1	31.80	1	14.50	2	18.55	2	20.20

### 5.1.3.2 Materiales limosos

En las Figuras 5.3 y 5.4 se presentan la variación de las propiedades de los suelos limosos muestreados y la Tabla 5.7 resume los valores promedio de cada uno de los materiales limosos.

Parámetro	TODOS		M1		M2		M3		M4		M5	
	Datos	Prom.										
Hn (%)	306	47.95	53	42.17	153	49.39	65	46.29	8	53.52	27	53.52
LL (%)	189	72.79	33	46.26	93	81.32	42	73.35	6	74.42	15	76.10
LP (%)	196	37.37	36	27.34	95	39.91	43	36.23	6	52.22	16	42.43
IP (%)	189	34.04	33	16.44	93	40.55	42	36.26	6	22.20	15	30.84
$\gamma_i$ (gr/cm <sup>3</sup> )	169	1.74	29	1.76	66	1.72	48	1.79	8	1.71	18	1.63
G <sub>s</sub>	71	2.68	13	2.65	26	2.65	24	2.73	2	2.76	6	2.61
Cu (Kg/cm <sup>2</sup> )	31	1.28	8	1.00	14	1.72	5	0.72	1	0.23	3	1.22
C <sub>CD</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	11	0.56	2	0.13	3	0.85	4	0.65			2	0.39
$\phi_{CD}$ (Grados)	11	25.23	2	36.05	3	21.63	4	24.00			2	22.25
e <sub>0</sub>	86	1.21	10	1.13	31	1.20	36	1.21	3	1.44	6	1.29
C <sub>c</sub>	86	0.392	10	0.392	31	0.359	36	0.383	3	0.808	6	0.410
C <sub>r</sub>	86	0.041	10	0.039	31	0.037	36	0.040	3	0.066	6	0.060
RSC	86	2.25	10	1.52	31	1.41	36	3.27	3	1.81	6	1.91
C <sub>TE</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	11	0.56	1	0.40	4	0.39	4	0.33			2	1.45
$\phi_{TE}$ (Grados)	11	24.74	1	30.00	4	23.25	4	28.03			2	18.50

**Tabla 5.7.** Propiedades promedio de los materiales limosos

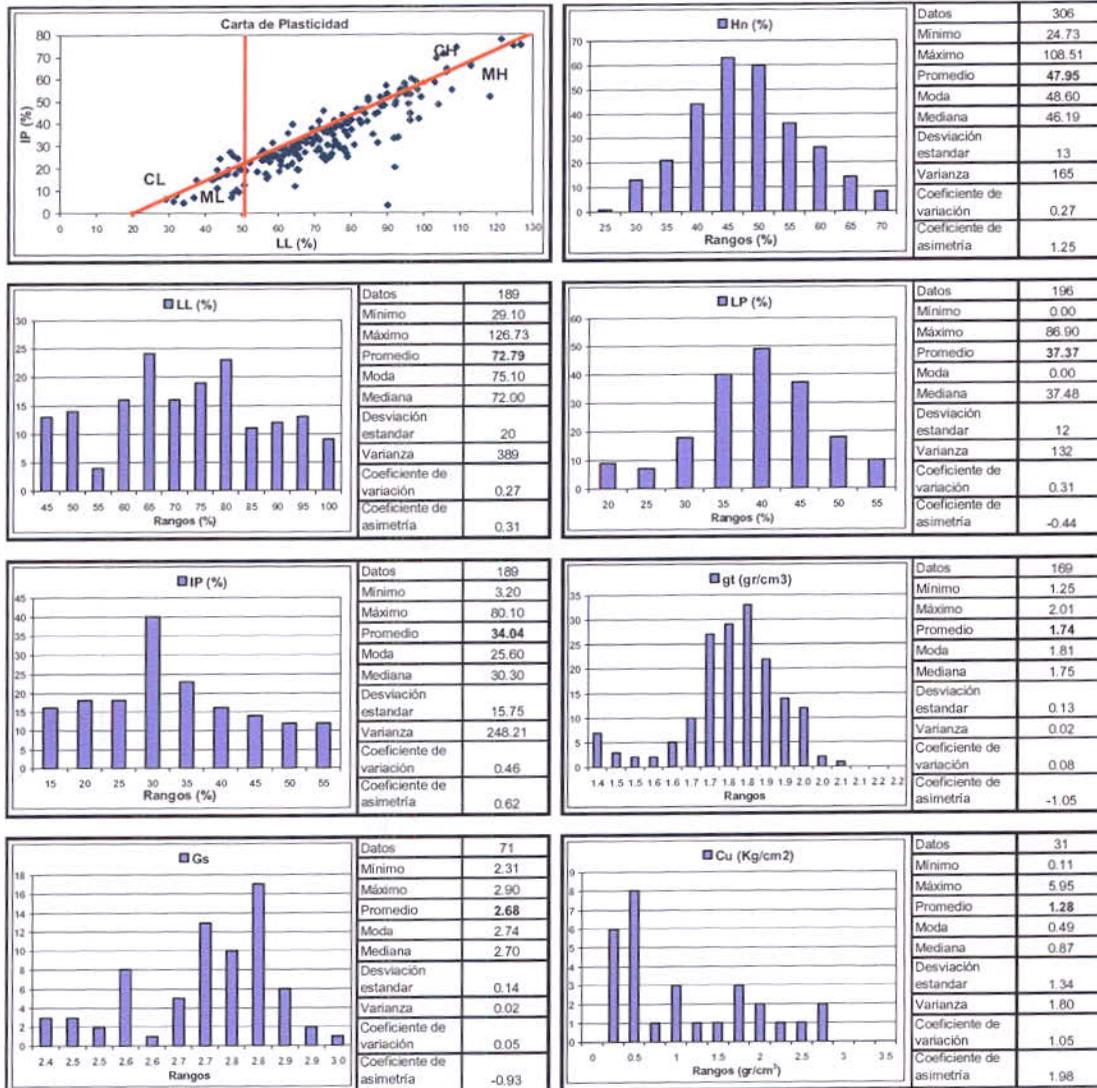


Figura 5.3. Estadísticas de los materiales limosos (1)

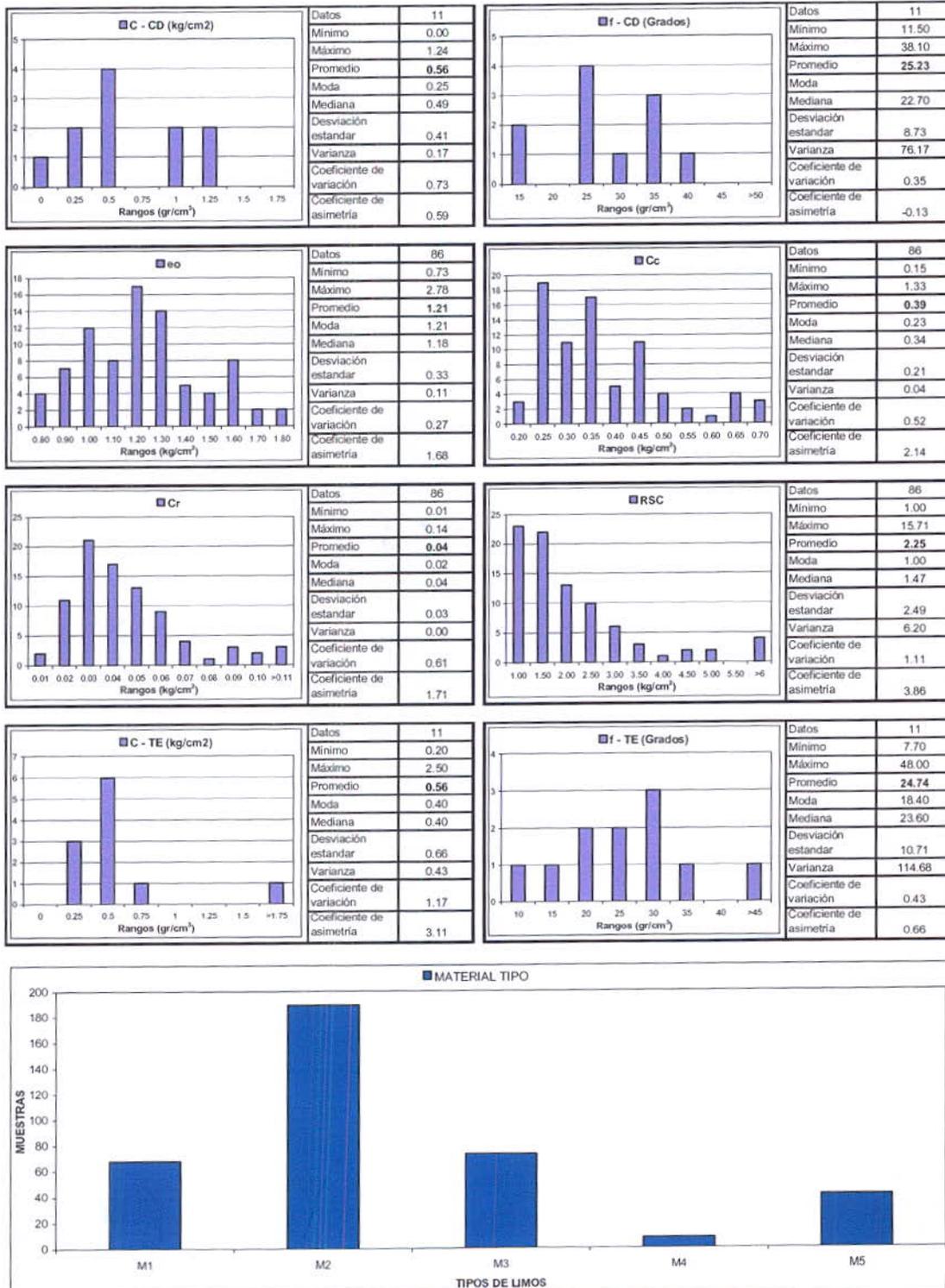


Figura 5.4. Estadísticas de los materiales limosos (2)

### 5.1.3.3 Materiales Arenosos

En las Figuras 5.5 y 5.6 se presentan la variación de las propiedades de los suelos arenosos muestreados y la Tabla 5.8 resume los valores promedio de cada uno de los materiales arenosos.

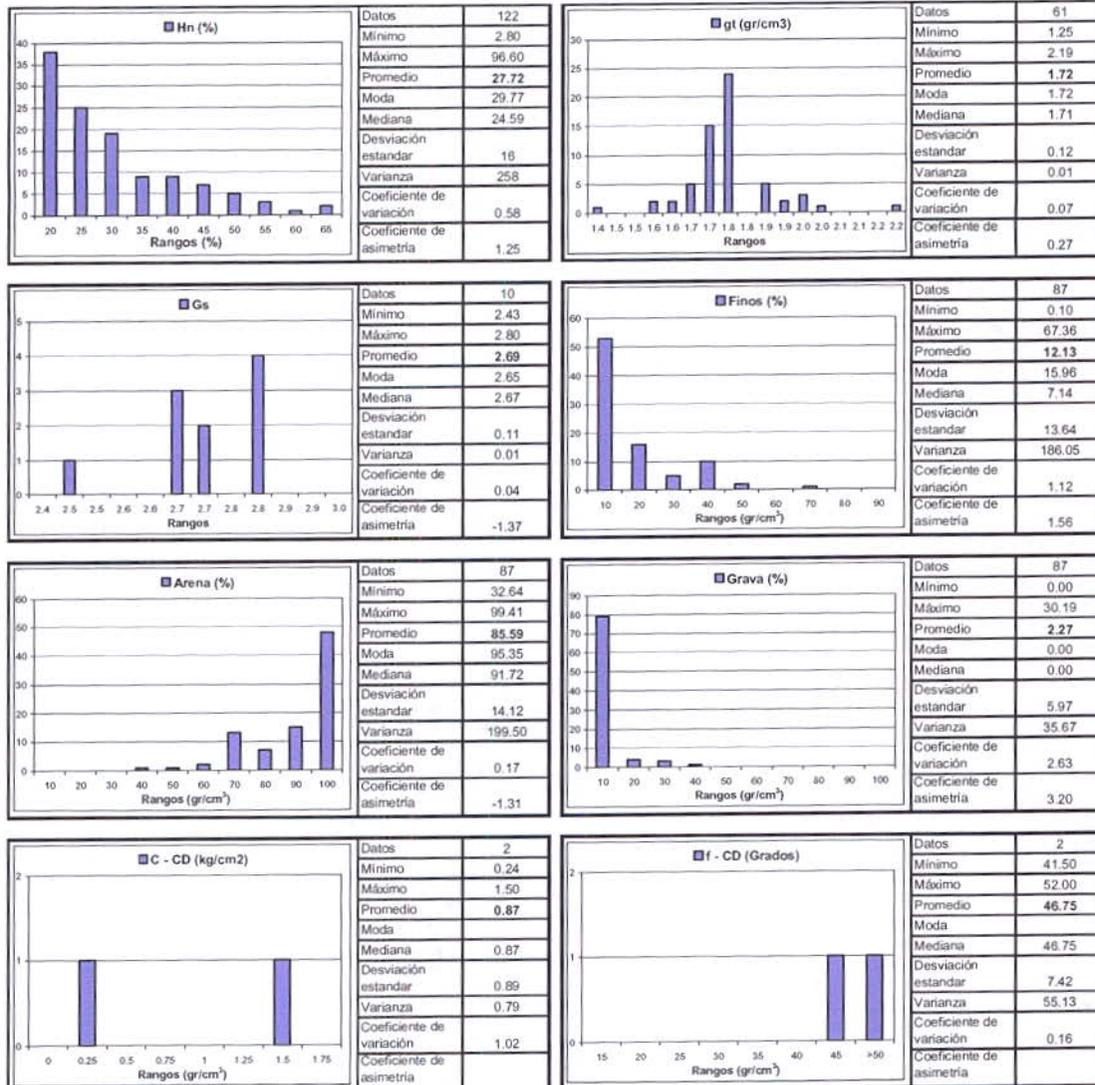


Figura 5.5. Estadísticas de los materiales arenosos (1)



Figura 5.6. Estadísticas de los materiales arenosos (2)

Tabla 5.8. Propiedades promedio de los materiales limosos

Parámetro	TODOS		S1		S2		S3		S4	
	Datos	Prom.								
Hn (%)	122	27.72	54	37.30	53	17.47	10	30.49	5	27.48
$\gamma_t$ (gr/cm <sup>3</sup> )	61	1.72	30	1.72	24	1.71	5	1.78	2	1.76
Gs	10	2.69	6	2.68	2	2.66			2	2.72
Grava (%)	87	2.27	32	0.44	50	3.65	4	0.23	1	0.00
Arena (%)	87	85.59	32	80.38	50	89.83	4	78.98	1	67.32
Finos (%)	87	12.13	32	19.18	50	6.52	4	20.79	1	32.68
C <sub>CD</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	2	0.87	2	0.87						
$\phi_{CD}$ (Grados)	2	46.75	2	46.75						
eo	11	1.01	6	1.16	2	0.70	2	0.80	1	1.10
Cc	11	0.390	6	0.470	2	0.273	2	0.207	1	0.507
Cr	11	0.025	6	0.022	2	0.018	2	0.047	1	0.010
RSC	11	1.38	6	1.42	2	1.18	2	1.66	1	1.00
C <sub>TE</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	20	0.08	12	0.13	7	0.00	1	0.00		
$\phi_{TE}$ (Grados)	20	35.32	12	35.03	7	35.61	1	36.80		

#### 5.1.3.4 Materiales Gravosos

En la **Figura 5.7** se presenta la variación de las propiedades de los suelos gravosos muestreados y la **Tabla 5.9** resume los valores promedio de cada uno de los materiales gravosos.

#### 5.1.3.5 Materia orgánica

En las **Figuras 5.8 y 5.9** se presentan la variación de las propiedades de los suelos orgánicos muestreados y en **Tabla 5.10** resume los valores promedio de cada uno de los materiales orgánicos.

### 5.2 SECCIONES GEOTÉCNICAS

Las secciones geotécnicas se plantearon en el sentido de la depositación de los materiales provenientes de las cuencas de la cordillera, es decir, en sentido occidente a oriente. Con esto se busca poder visualizar las siguientes zonas: el piedemonte, el ápice, la parte media y distal de los abanicos, hasta llegar a la llanura de inundación del río Cauca, y en lo posible, interpretar el sector de interdigitación entre los abanicos y la llanura aluvial. Tales secciones recogen la información geológica, geofísica y geotécnica levantada, tanto a nivel superficial como en profundidad, en la ciudad de Cali durante el desarrollo del estudio, además de la información más relevante de la BDG.

En general, el perfil de sedimentación se caracteriza por que los materiales más gruesos se encontraran hacia los ápices de los abanicos, mientras que hacia la parte distal de los mismos se encontraron los materiales más finos. Bajo este enfoque, se puede concluir que la principal limitación de las secciones es que no se puede observar la coalescencia entre los abanicos, por ello, es necesario acudir a otro tipo de información que espacialmente ayude a inferirlos.



Figura 5.7. Estadísticas de los materiales gravosos (1)

Tabla 5.9. Propiedades promedio de los materiales gravosos

Parámetro	TODOS		G1		G2		G3		G4	
	Datos	Prom.								
Hn (%)	28	13.4	4	18.5	2	0.7	17	12.1	5	18.7
$\gamma_t$ (gr/cm <sup>3</sup> )	4	2.2					2	1.9	2	2.4
Grava (%)	28	89.7	6	93.7	2	95.6	18	89.2	2	76.1
Arena (%)	28	5.3	6	1.0	2	1.5	18	5.9	2	15.8
Finos (%)	28	5.0	6	5.3	2	2.9	18	4.8	2	8.2

817

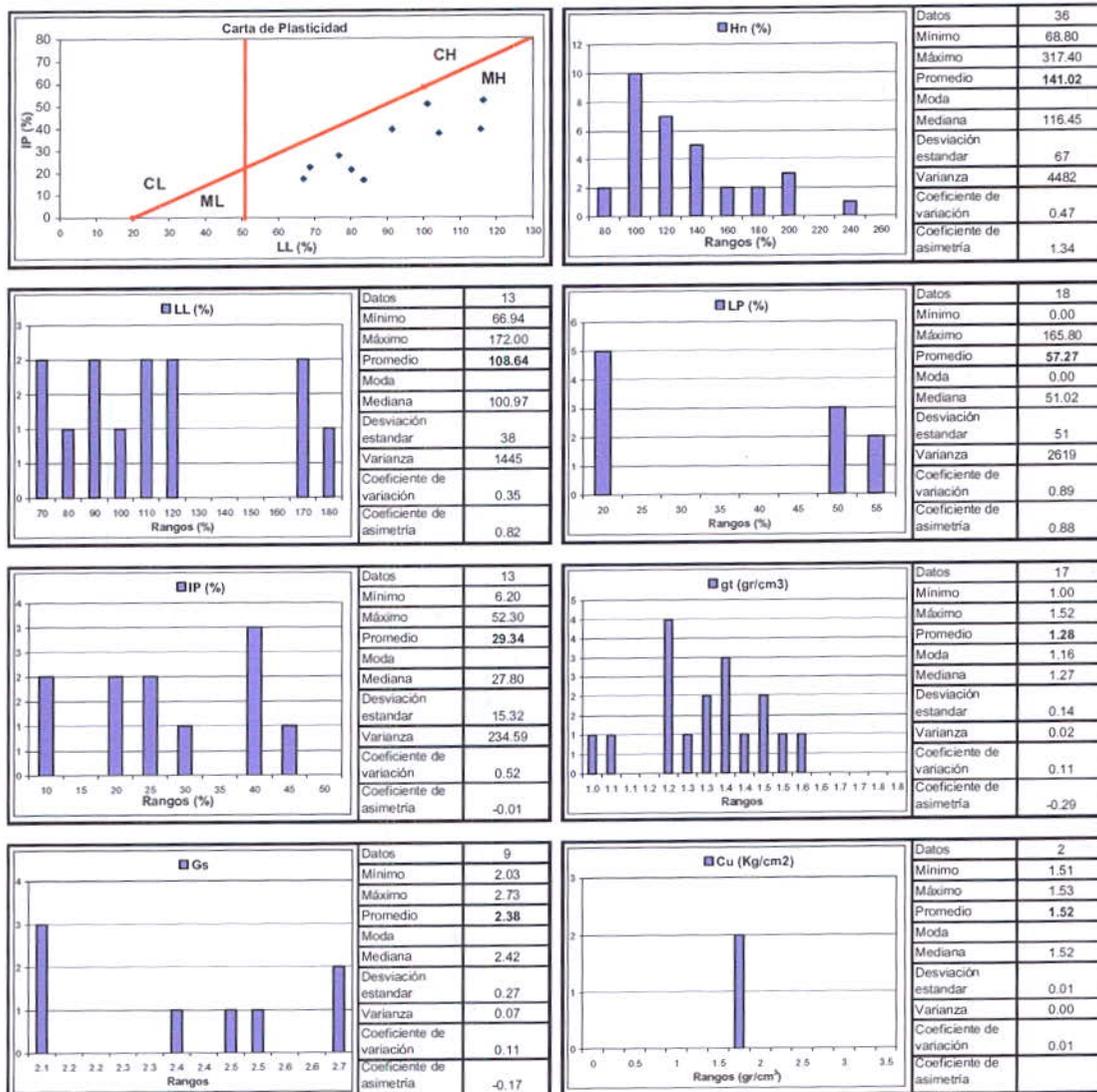


Figura 5.8. Estadísticas de los materiales orgánicos (1)

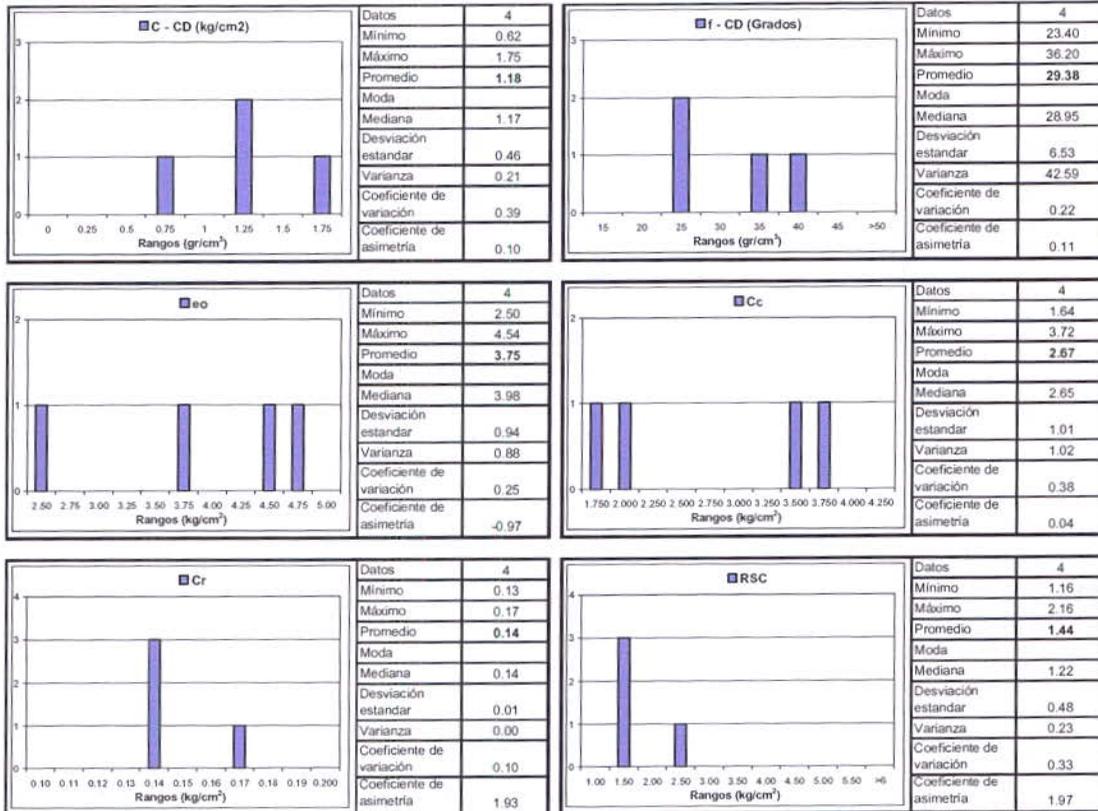


Figura 5.9. Estadísticas de los materiales orgánicos (2)

Tabla 5.10. Propiedades promedio de los materiales orgánicos

Parámetro	TODOS		P1		P2	
	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.
Hn (%)	36	141.0	21	122.2	15	167.3
LL (%)	13	108.6	7	93.4	6	126.4
LP (%)	18	57.3	10	43.7	8	74.2
IP (%)	13	29.3	7	30.9	6	27.5
$\gamma_t$ (gr/cm <sup>3</sup> )	17	1.3	8	1.3	9	1.2
Gs	9	2.4	5	2.4	4	2.4
Cu (Kg/cm <sup>2</sup> )	2	1.5	1	1.5	1	1.5
C <sub>CD</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	4	1.2	2	1.5	2	0.9
$\phi_{CD}$ (Grados)	4	29.4	2	28.6	2	30.2
eo	4	3.749	1	2.500	3	4.166
Cc	4	2.666	1	1.642	3	3.007
Cr	4	0.143	1	0.136	3	0.146
RSC	4	1.4	1	2.2	3	1.2
C <sub>TE</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	1	1.0	1	1.0		
$\phi_{TE}$ (Grados)	1	30.0	1	30.0		

En la **Tabla 5.11** se muestran los nombres de las exploraciones, las unidades geológicas superficiales (UGS) y el abanico aluvial que conforman cada sección geotécnica. La localización de estas secciones se muestra en la **Figura 5.10** junto con las exploraciones del subsuelo. A cada una de las secciones geotécnicas se les ha indicado las unidades geológicas superficiales (UGS) que interceptan, las zonas geotécnicas y los principales horizontes de suelo encontrados, como se muestra en el Anexo 4.

Es importante aclarar que la lectura de tales secciones debe hacerse con cuidado y criterio, dada la complejidad geológica como se conformó el depósito, y que la separación de las perforaciones realizadas fluctúa entre 1 y 4 Km, por lo cual establecer de una forma precisa como es la disposición de los materiales sería pretencioso. Por lo anterior, estas secciones “indican” a manera general, la posible disposición de grandes paquetes de materiales asociados a eventos geológicos, observándose una mayor densidad de paquetes superficiales debido a la disponibilidad de mayor información, con la cual se pueden “inferir” con mayor precisión otras capas de materiales.

**Tabla 5.11.** Secciones Geotécnicas Indicativas

SECCIÓN	PERFORACIÓN	UGS	Abanico
0	Parque del Amor, INEM y PTAR	Rs, Is, Sal 2, Sal 5, Sal 7 y Sal 1	Menga
1	Vivero Municipal, INEM y Floralia	Iv, Rs, Is, Sft, Sal 7, Sal 2 y Sal 1	Cali
2	Parque de la Caña y PTAR	Sft, Sal 7, Sal 2, Sal 1 y Sal 5	Cali
3	Colegio José Camacho y Puerto Mallarino	Iv, Sft, Sal 2, Sal 5 y Sal 1	Cali
4	Instituto Tobías, Panamericanas, Centro de Salud H. Garcés, El Pilar II y Decepaz	Rs, Is, Sal 2, Sal 1 y Sal 4	Cañaveralejo
5	Velódromo, Palmetto, Guadalupe, Parque Villa del Sur y P. Vallado	Rs, Sal 2, Sal 7, Sal 5, Sal 4, Sal 1 y Sal 3	Cañaveralejo
6	Nápoles, Pasoancho, Comfandi, Aguas del Sur y Navarro	Is, Sft, Sal 2, Sal 1, Sal 5, Sal 3, Sal 6 y Sal 4	Meléndez
7	Club Campestre, INGEOMINAS y Meléndez	Sal 7, Sal 2 y Sal 1	Lili y Meléndez
8	Valle del Lili, Autónoma y Comfenalco	Sfa y Sal 2	Cañas Gordas y Pance

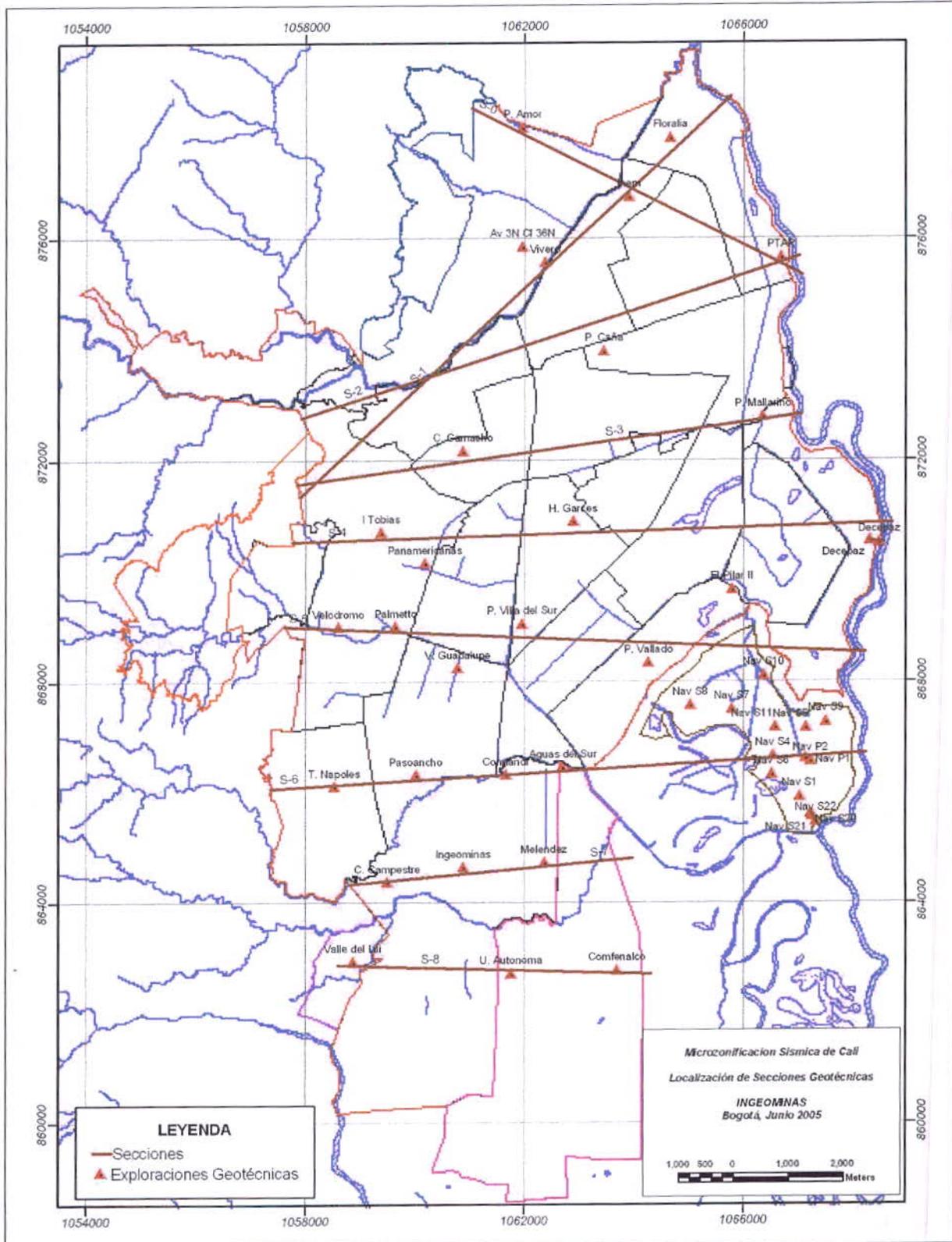


Figura 5.10. Localización de las Secciones Geotécnicas Indicativas realizadas en la Ciudad de Cali



---

## CAPITULO 6

---

### ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica que se presenta en este capítulo busca integrar información proveniente de diferentes fuentes, como son los mapas geológicos y geomorfológicos, la exploración geofísica, las pruebas de microtrepidaciones, los reconocimientos de campo, la caracterización de los materiales hallados en la exploración del subsuelo, la información proveniente de estudios de suelos realizados previamente en la ciudad y las sugerencias de expertos, entre otros.

En vista de lo anterior, la zonificación pretende realizar la concepción de un modelo geológico – geofísico – geotécnico de los materiales (Rocas y Suelos) presentes en el área de estudio. Este modelo es de gran utilidad en los análisis de efectos locales y respuesta sísmica ya que incorpora implícitamente aspectos como: secuencia estratigráfica, materiales tipo, periodos de vibración, anomalías residuales, profundidad del basamento sísmico, propiedades dinámicas de los suelos, entre otros.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que en tal modelo no se detalla la presencia de los materiales superficiales de características específicas, que son objeto de otro tipo de estudio (e.i. suelos expansivos, capacidad portante). A continuación se tratan los aspectos conceptuales y metodológicos de una zonificación geotécnica enfocada a la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Cali.

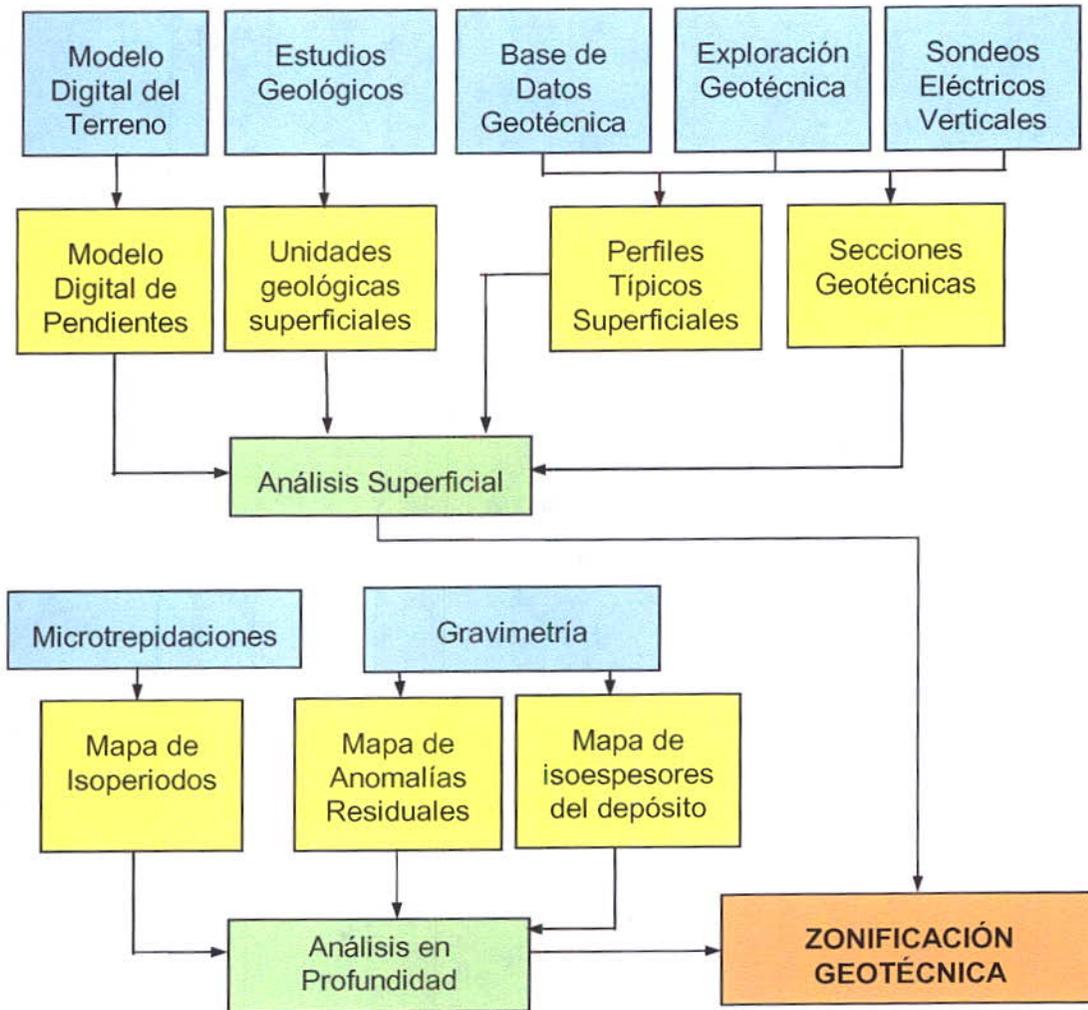
#### 6.1 SÍNTESIS E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN

La metodología general para la elaboración de la zonificación geotécnica se explicó anteriormente en el Capítulo 1 (ver **Figura 1.3**). Conforme a los requerimientos específicos que se dieron a lo largo del desarrollo de las investigaciones, esta fue objeto de ajustes y complementaciones, de tal manera que la zonificación geotécnica se definió mediante el diagrama de flujo de se presenta en la **Figura 6.1**. Como se muestra en el diagrama, la metodología consiste en realizar de una forma sistemática la integración de la información multidisciplinaria local como la geológica, geofísica y geotécnica. Para ello se partió de las diferentes temáticas trabajadas (cuadros de color azul), de las cuales se han generado una serie de coberturas de información o productos (cuadros de color amarillo). Paso seguido se analizan las coberturas bajo dos enfoques: uno a nivel superficial y otro a nivel de todo el depósito o en profundidad (cuadros de color verde).

En el análisis superficial se superponen al Modelo Digital del Terreno (MDT) las unidades geológicas superficiales, los perfiles típicos y secciones geotécnicas, con el fin de diferenciar dentro de una misma unidad geológica superficial la presencia de materiales típicos y zonas de inter- digitación con otras unidades, como por ejemplo el límite entre los abanicos aluviales y la llanura aluvial.

En el análisis detallado en profundidad se superponen los mapas de isoperiodos, anomalías residuales gravimétricas y profundidad del depósito cuaternario, con lo cual se busca inferir los límites entre los principales abanicos aluviales.

Finalmente, al integrar los análisis superficiales y profundos se obtienen las zonas geotécnicas, que desde el punto de vista de respuesta sísmica, cada una de ellas presentará un comportamiento específico en función de su composición y caracterización geomecánica de los materiales superficiales, como de las características generales del depósito en profundidad.



**Figura 6.1.** Proceso Metodológico Detallado para la Zonificación Geotécnica de Cali con propósitos de Respuesta Sísmica

Cabe anotar que dichos análisis han sido de carácter eurístico, es decir, con base en el buen criterio y juicio del conocimiento del modelo geológico – geofísico – geotécnico y de la mecánica de suelos aplicada. Esto se debe a que el tratamiento mediante las herramientas de análisis SIG, demanda tener un volumen considerable de información y de tiempo para determinar las mejores funciones que interrelacionen cada una de las coberturas. Por otro



823

lado, las coberturas basadas en interpolaciones espaciales (e.i. isoperidos, anomalías residuales), deben analizarse con precaución y criterio debido a que las condiciones de frontera y la densidad del muestreo pueden conducir a interpretaciones erróneas de los datos.

Dado que el proceso de análisis incorpora varios tipos de información, es necesario estructurar cada temática involucrada en coberturas de información. Para ello, la información se articuló en un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGIS by ESRI) con el fin de poder realizar los análisis que se presentan a continuación (ver informe No.6.2, Subproyecto de Cartografía, Proyecto MZSCali, 2005).

## 6.2 COBERTURAS DE INFORMACIÓN

En la **Tabla 6.1** se resumen los trabajos a nivel local desarrollados por el Proyecto MZSCali, además de los principales productos obtenidos por cada temática. Si bien todos los productos y/o coberturas no se han tenido en cuenta directamente en la metodología, si se han analizado indirectamente para tener criterios que ayuden a establecer las zonas, por ejemplo, la Evaluación de Daños por el Sismo de Pizarro en la ciudad de Cali ha brindado elementos de juicio para soportar ciertas zonas.

A continuación se explica brevemente cada una de las coberturas tenidas en cuenta para la zonificación geotécnica con propósitos de respuesta sísmica. En la **Figura 6.2** se observan todos los trabajos de campo realizados en la ciudad por el Proyecto MZSCali.

### 6.2.1 Modelo Digital del Terreno (MDT)

Esta cobertura de información esta compuesta principalmente por la información suministrada por planeación municipal de Cali, la cual fue complementada con cartografía más reciente de la zona sur-oriental de la ciudad facilitada por la Corporación del Valle del Cauca (CVC). Con base en esta cartografía se elaboraron los modelos digitales de elevación y pendientes para la ciudad de Cali a escala 1:10.0000 (**Figura 6.3**) (ver informe No.6.2, Subproyecto de Cartografía, Proyecto MZSCali, 2005).

### 6.2.2 Geología y Geomorfología

Corresponde a la cartografía de geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología y morfodinámica. Para el propósito de respuesta sísmica el mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) o de "Geología para Ingeniería", es el principal insumo que aporta esta temática, debido a que en él se presentan desde un punto de vista ingenieril, los depósitos superficiales diferenciados por su origen litológico y estado de meteorización (**Figura 6.4**) (ver informe No.2.1, Subproyecto de Geología, Proyecto MZSCali, 2005).

### 6.2.3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Los trabajos de geofísica comprendieron la realización de 263 sondeos eléctricos verticales (SEV), con los cuales se realizaron 13 perfiles geoeléctricos típicos que cortan en sentido occidente - oriente y cubren los principales abanicos que forman la ciudad, así como la zona de llanura aluvial y el sector de Navarro. Con esta información se observó una buena correlación geológica y aportó un panorama de los tipos de depósitos presentes hasta una



profundidad promedio de 200 m (ver informe No.3, Subproyecto de Geofísica, Proyecto MZSCali, 2005).

**Tabla 6.1.** Temáticas del Proyecto a nivel local articuladas bajo ArcSIG

No	COBERTURA	BASE DE DATOS	PRODUCTO
1	Base Cartográfica Local Escala 1:10.000	No Aplica	Cartografía Local Modelo digital del Terreno Modelo de Pendientes del Terreno
2	Geología y Geomorfología	Puntos de control de Campo de morfodinámica	Unidades Geológicas Unidades Geológicas Superficiales Unidades Geomorfológicas
3	Sondeos Eléctricos Verticales	Modelo de capas por resistividad eléctrica	Secciones geoelectricas
4	Gravimetría	Modelo de capas por anomalías gravimétricas	Secciones gravimétricas. Anomalías regionales. Anomalías Residuales. Modelos de Isoprofundidades.
5	Sísmica	Modelo de capas por velocidad de onda	Refracción y Reflexión Sísmica
6	Microtrepidaciones	Periodos predominantes	Mapa de Isoperiodos.
7	Red de Acelerógrafos	Sitios de las estaciones de Acelerógrafos (temporal y permanente)	Red de Acelerógrafos de Cali.
8	Rellenos Antrópicos	Puntos de control de Campo	Identificación de Rellenos Antrópicos
9	Geotecnia	Base de Datos de Sitios de Exploración Base de Datos Geotécnica	Sitios de exploración (perforaciones y sondeos) Secciones geotécnicas. Localización de estudios de la BDG. Perfiles Típicos Geotécnicos.
10	Sismo de Pizarro	Inventario de Daños y encuestas de intensidad	Localización de Daños e intensidades por el Sismo de Pizarro.
11	Respuesta	Parámetros Espectrales	Microzonas de Respuesta Sísmica
12	Dirección de Proyecto	Base de Datos de Trabajos de Campo	Localización de Trabajos de Campo.

825

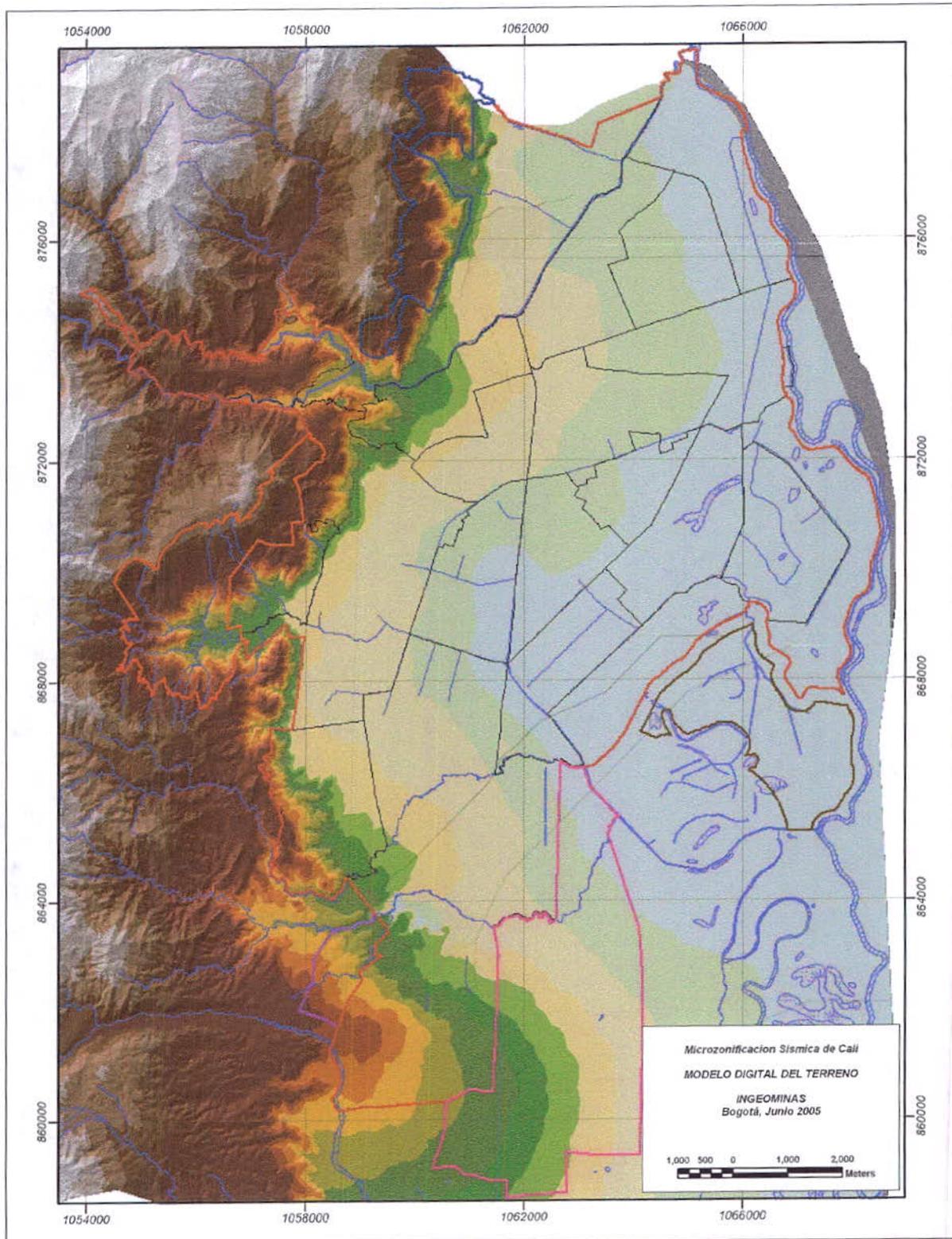


Figura 6.3. Modelo Digital del Terreno

B26

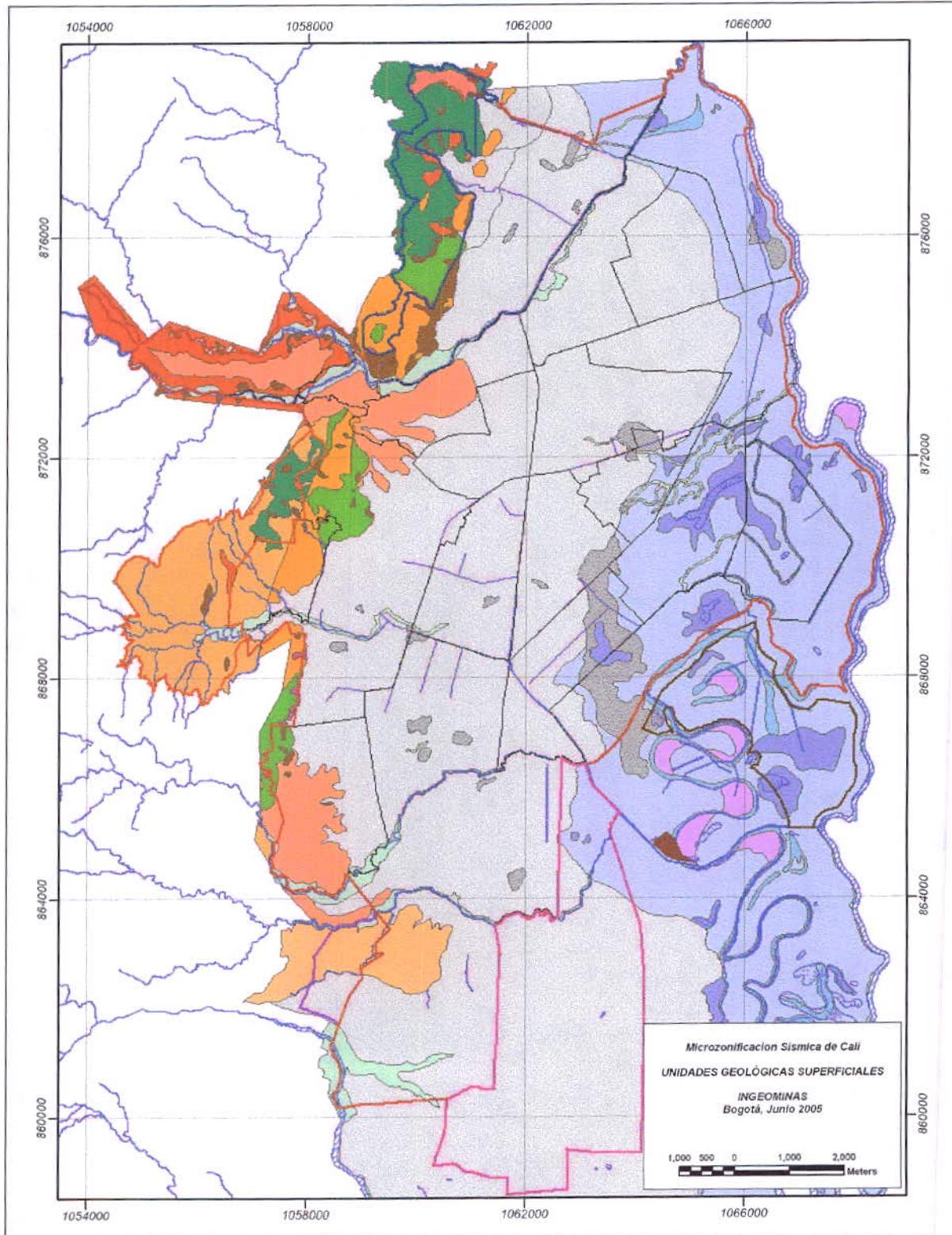


Figura 6.4. Unidades Geológicas Superficiales



#### 6.2.4 Gravimetría

Los trabajos de gravimetría comprendieron la realización de 479 estaciones gravimétricas, con lo cual se elaboró una grilla de análisis definida integralmente con las otras temáticas, además se definieron 10 perfiles gravimétricos que, igualmente, cortan de occidente a oriente la ciudad. Con ello se busca estimar la forma de la cuenca geológica y la profundidad del Terciario y del basamento rocoso, teniendo en cuenta los resultados de la interpretación sísmica y gravimetría regional (**Figura 6.5**). A su vez, el mapa de anomalías residuales gravimétricas (ARG) presenta la distribución espacial de los cambios gravimétricos del depósito (**Figura 6.6**), lo cual está directamente relacionado con el peso y espesor de los materiales que conforman el depósito (ver informe No.3, Subproyecto de Geofísica, Proyecto MZSCali, 2005).

#### 6.2.5 Microtrepidaciones

Se realizaron 163 puntos de microtrepidaciones en el área de estudio, los cuales incluyen los sitios donde se ubicaron las estaciones de acelerógrafos (temporal y permanente). Con base en los resultados de estos ensayos se elaboró el mapa de isoperiodos (ISP) (**Figura 6.7**) (ver informe No.5.1, Subproyecto de Respuesta Sísmica, Proyecto MZSCali, 2005). Aunque los periodos de vibración son obtenidos para niveles bajos de deformación, este producto ayuda a estimar el comportamiento dinámico del depósito, dado que el periodo natural de vibración de un depósito es proporcional al espesor del mismo e inversamente proporcional a la velocidad de onda.

#### 6.2.6 Base de Datos Geotécnica (BDG)

La Base de Datos Geotécnica cuenta con 1162 estudios de suelos, 4860 exploraciones y 28228 muestras, con un promedio de exploración de 10 m de profundidad. Con esta información se elaboró la cobertura de Perfiles Típicos Superficiales (PTS), con la cual se busca identificar zonas con secuencias de materiales típicos similares (**Figura 6.8**).

#### 6.2.7 Exploración Geotécnica

La exploración geotécnica comprendió la ejecución de 30 perforaciones, 22 sondeos con el piezocono sísmico y 18 pruebas de Down Hole. Con estos trabajos se realizaron perfiles geotécnicos completos, dando una buena información en profundidad (50 metros en promedio) y presentan las propiedades geomecánicas estáticas y dinámicas de los materiales explorados, complementando así la información recopilada en la BDG a nivel superficial.

#### 6.2.8 Secciones Típicas Geotécnicas (STG)

La distribución de las exploraciones permitió la elaboración de 9 secciones geotécnicas, las cuales fueron complementadas con la información geotécnica disponible de la Base de Datos Geotécnica (BDG) y los sondeos eléctricos verticales. Con estas secciones se busca conceptuar el modelo geológico – geofísico – geotécnico de los depósitos hasta 50 m de profundidad.

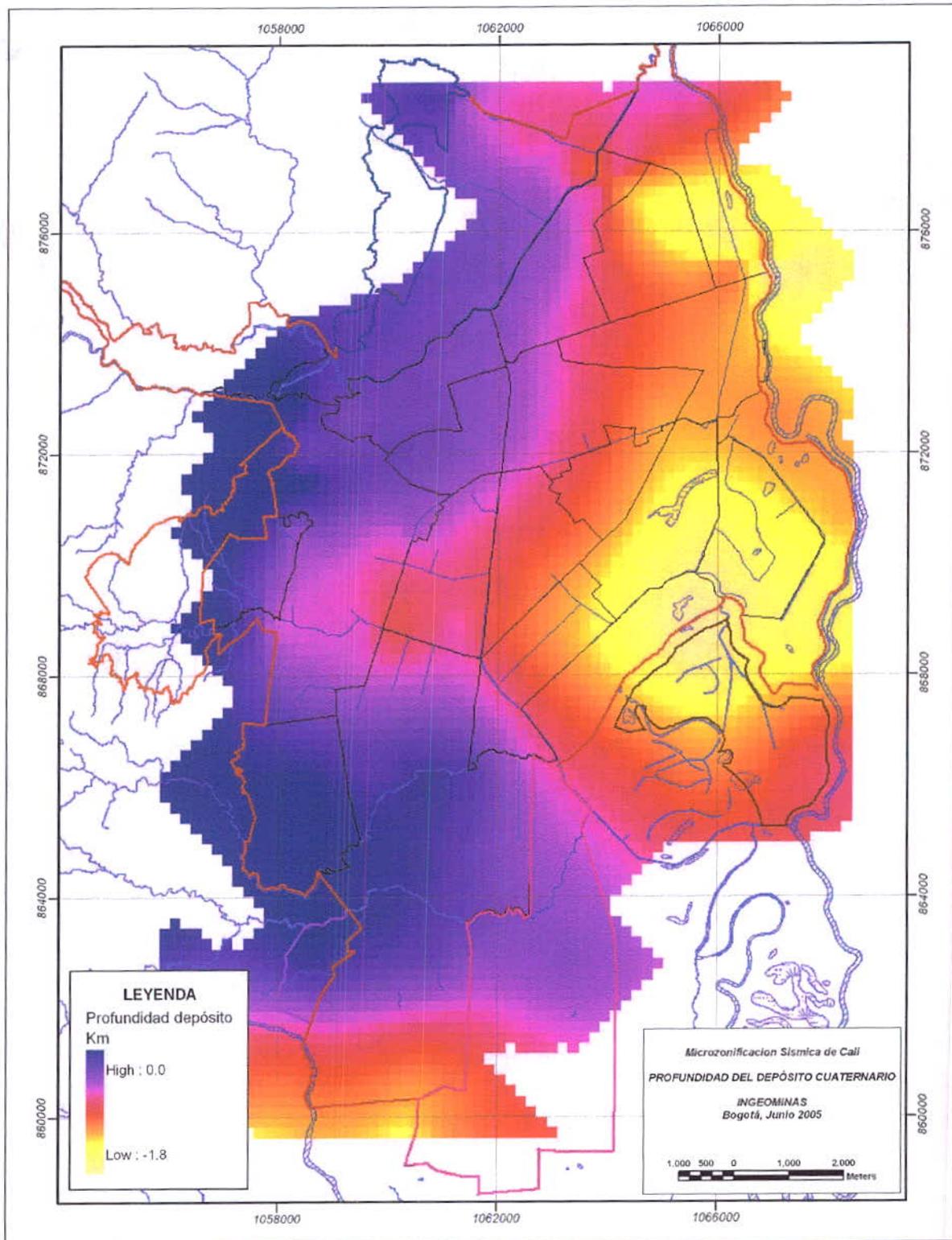


Figura 6.5. Espesores del depósito cuaternario

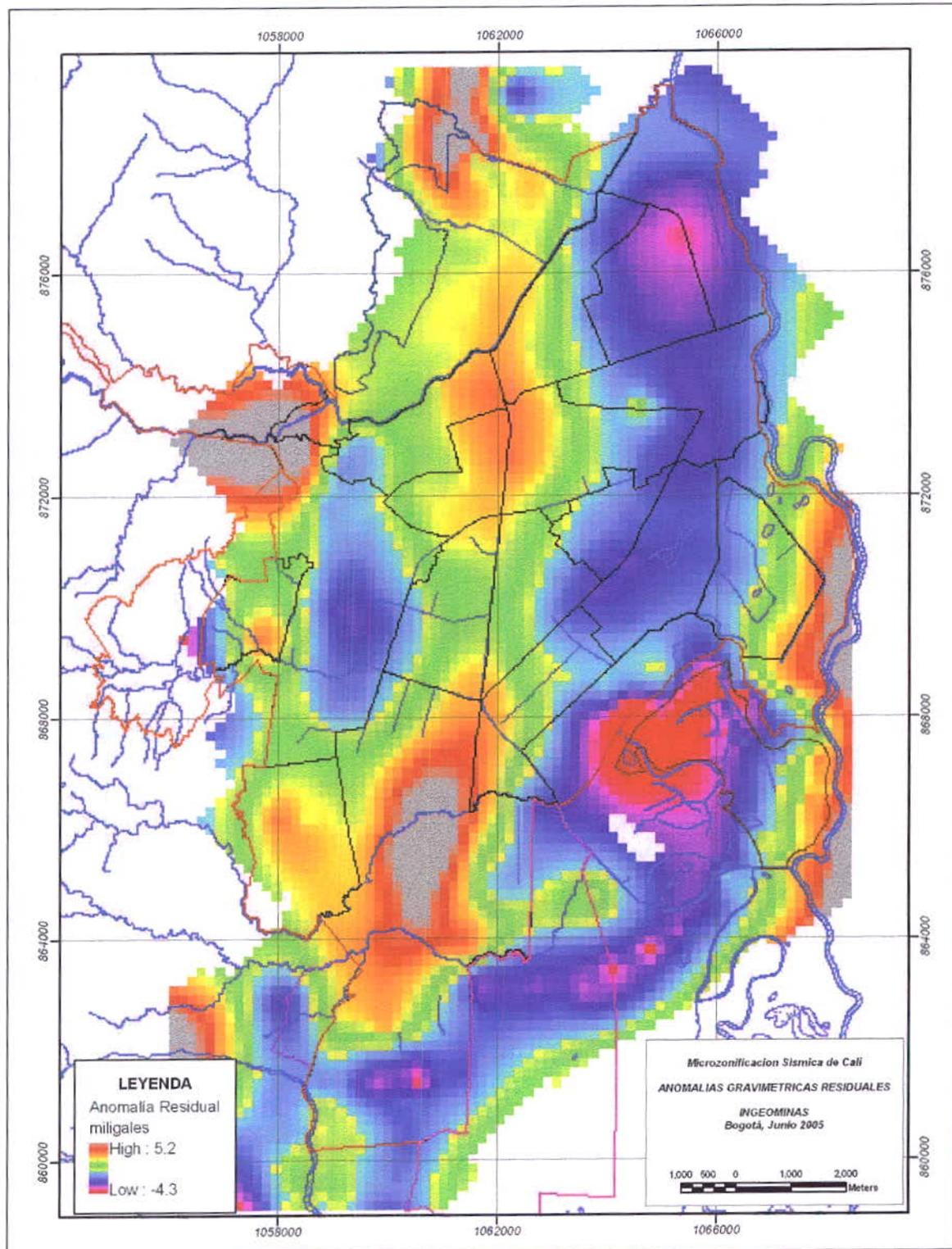


Figura 6.6. Anomalías Residuales Gravimétricas

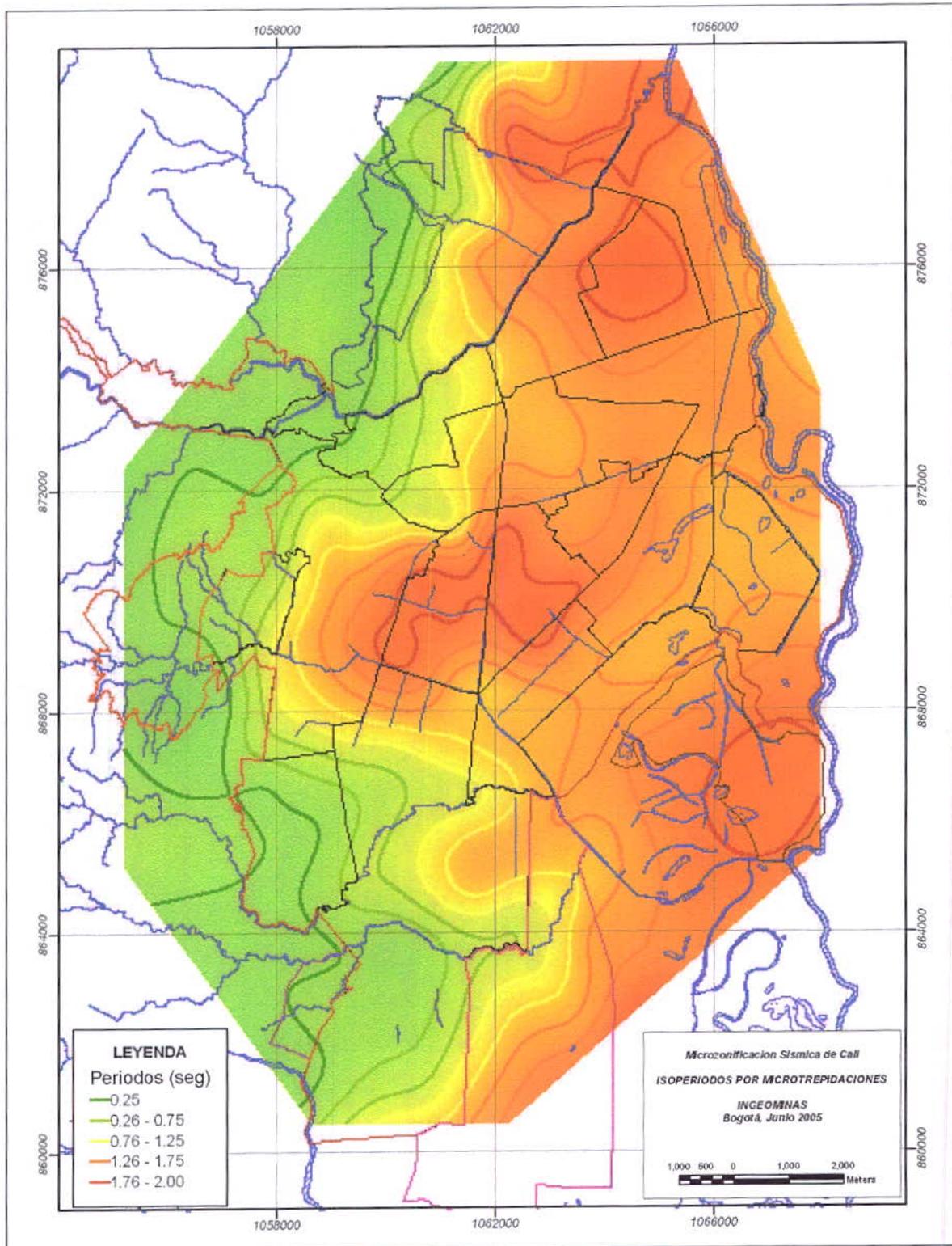


Figura 6.7. Isoperiodos por Microtrepidaciones

831

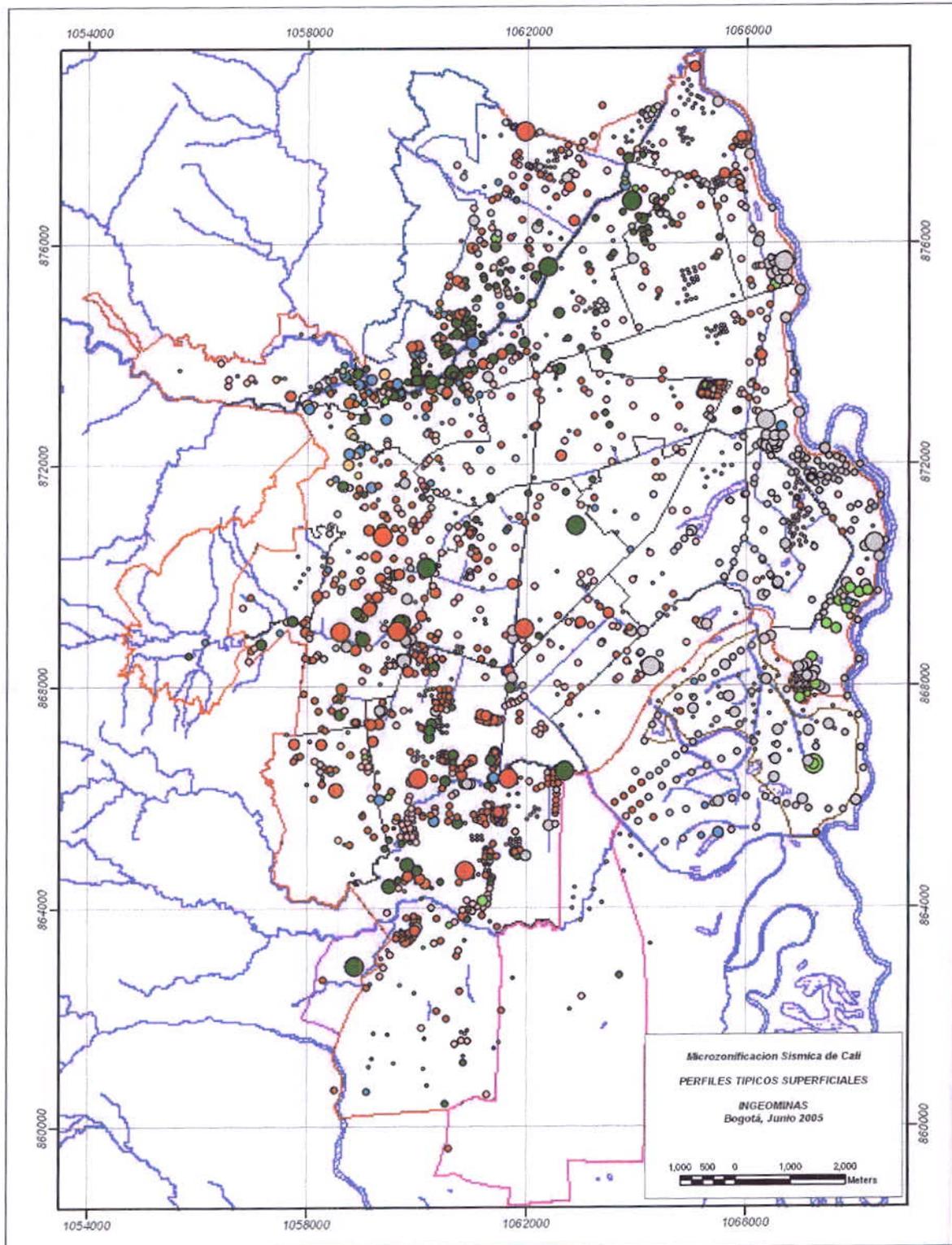


Figura 6.8. Perfiles Típicos Superficiales a partir de la BDG



### 6.2.9 Cruces temáticos

A manera de ilustrar el proceso de cruces temáticos por medio del SIG del proyecto, se presentan en las **Figuras 6.9 y 6.10** la superposición realizada en los análisis superficiales y los análisis en profundidad respectivamente.

### 6.3 ZONAS GEOTÉCNICAS PROPUESTAS

A partir de la información anteriormente explicada, se definieron 10 zonas de comportamiento geotécnico similar, como se ilustra en la **Tabla 6.2**. Los resultados de dicha zonificación se presentan en el **Mapa MZSC - GT1**, el cual será la base para los análisis de respuesta sísmica y efectos locales, así como para la definición del mapa de microzonificación sísmica de la ciudad.

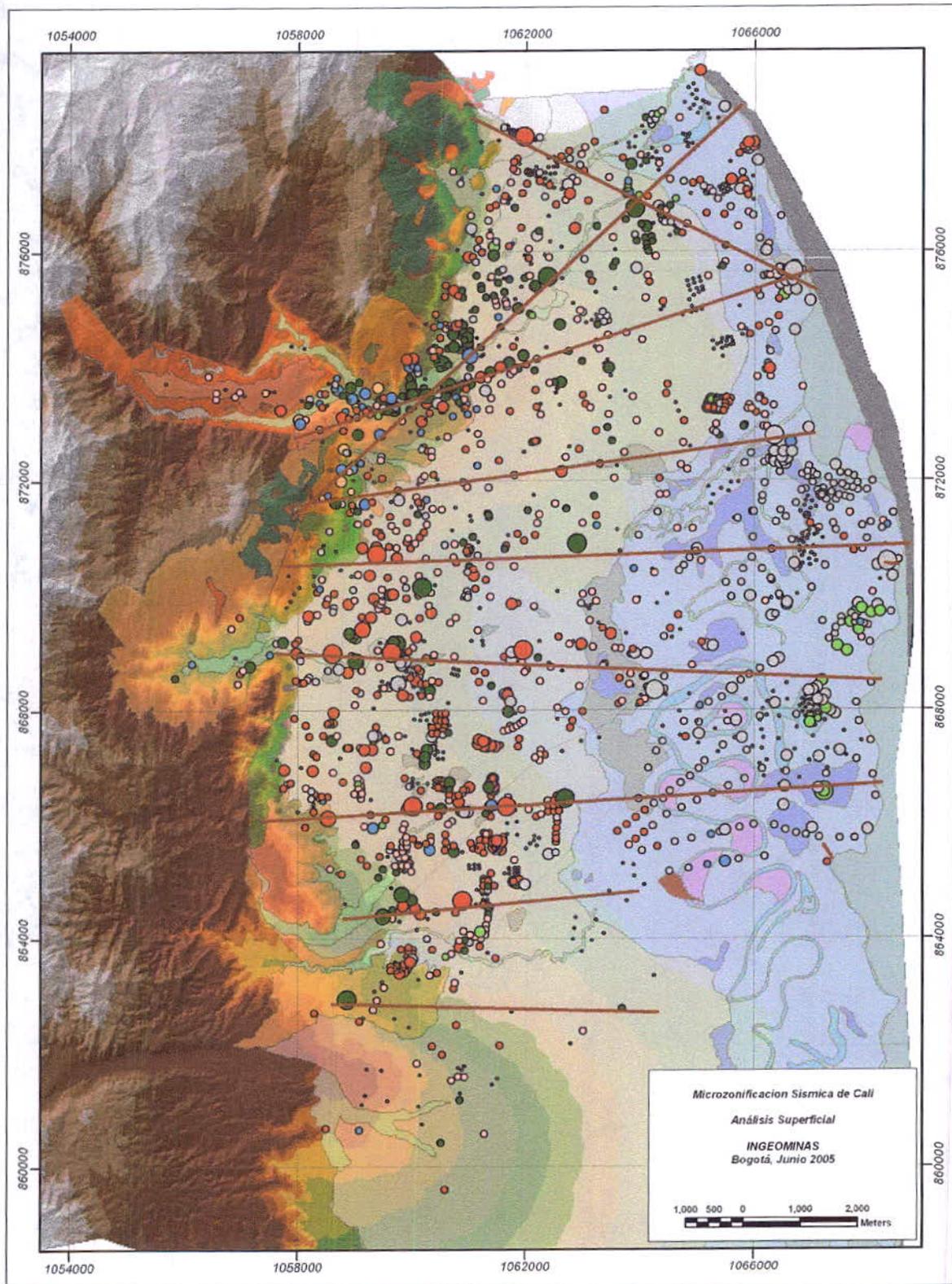
Cabe anotar que en el presente informe se describen con un mayor detalle los materiales concernientes a los flujos, abanicos y llanura aluvial, ya que allí se concentra la mayor parte de la población y porque el espesor de estos depósitos son considerables, presentando un comportamiento dinámico complejo. Con base en la información recopilada en la BDG, se asignó a cada zona geotécnica las exploraciones realizadas en ella. Con ello se realizaron análisis estadísticos de los índices y parámetros geotécnicos tales como: Clasificación USGS, Humedad Natural, Limite Líquido, Limite Plástico, Índice de Plasticidad, Peso Unitario, Resistencia al corte no Drenada, Número de Golpes (SPT) y Granulometría (Porcentaje de Gravas, Arenas y Finos). Estos análisis se ilustran en forma de Histogramas de Frecuencias junto con sus valores estadísticos en el Anexo 5.

#### 6.3.1 Zona 1a. Roca y material intermedio volcánico

Esta zona esta conformada por las rocas ígneas básicas de la Formación Volcánica, que corresponden a diabasas y microgabros con intercalaciones menores de lavas almohadilladas, de color verde grisáceo en estado fresco, a pardo oscuro cuando están meteorizadas. En términos generales estas rocas se encuentran medianamente fracturadas, son pesadas, densas y muy duras; para su fraccionamiento es necesario utilizar explosivos, tal como se hace en todas las canteras que se ubican dentro del área de estudio. Asociado a esta unidad es común el desprendimiento y caída de bloques.

El material intermedio volcánico se caracteriza por presentar un color verde parduzco a café, con abundantes fracturas y moderada a alta meteorización, que lo hace fácil de excavar con buldózer. Es aprovechado como material de construcción en todas las canteras que existen en la ciudad y es comúnmente conocido como roca muerta. En cuanto a estabilidad, presenta frecuentes procesos de remoción en masa tales como desprendimientos en cuña, caída de bloques y flujos de detritos. Su espesor es bastante variable, pero se estima que puede ser mayor a los 10 metros.

Esta zona fue cartografiada hacia las cuencas de las quebradas Menga, El Bosque, Chipichape, cuencas de los ríos Aguacatal y Cali, donde la roca se explota a cielo abierto. Localmente también se presentan hacia el flanco oriental del Cerro Cristo Rey, donde forma filos agudos y donde la morfología es moderada a abrupta.



**Figura 6.9.** Superposición de Modelo Digital del Terreno (MDT), Unidades Geológicas superficiales (UGS), Perfiles Típicos Superficiales (PTS) y Secciones Típicas Geotécnicas (STG)

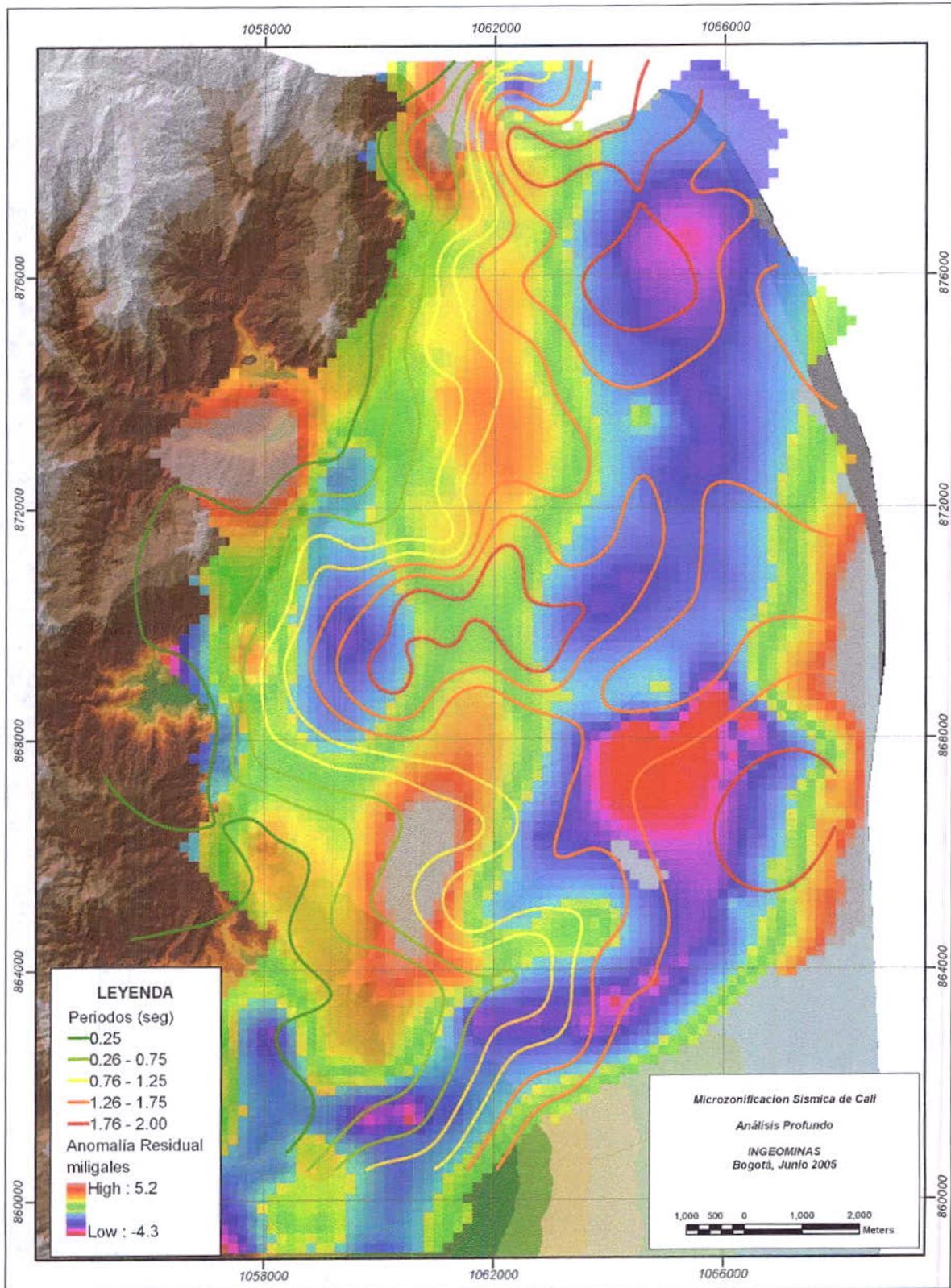


Figura 6.10. Superposición de Anomalías Residuales Gravimétricas (ARG) e Isoperiodos (ISP)



835

**Tabla 6.2.** Zonas Geotécnicas definidas en la ciudad de Cali con propósitos de evaluar la respuesta sísmica local.

ZONA GEOTÉCNICA	NOMBRE	Unidad Geológica Superficial	PERFORACIÓN
1	1a. Roca y material intermedio volcánico	Rv, Iv	
	1b. Roca y material intermedio sedimentario	Rs, Is	
2	2a. Flujo Terrón Colorado	Sft	
	2b. Flujo Alto Nápoles	Sft	Tanques Nápoles
	2c. Flujo Cañas Gordas	Sfa	Valle de Lili
3	3. Suelo Residual	Sv	
4	4. Suelo Colusión	Sco	
6	6a. Abanico de Menga y Bosque	Sal2	P. Amor
	6b. Abanico Medio de Cali	Sal2	Camacho
	6c. Abanico Distal de Cali	Sal2	P. Caña Vivero INEM
	6d. Abanico de Cañaveralejo	Sal2	Velódromo Palmetto I. Tobías Panamericanas
	6e. Abanico de Meléndez y Lili	Sal2	Club Campestre Guadalupe INGEOMINAS Pasoancho Comfandi
	6f. Abanico de Pance	Sal2	Autónoma
7	7. Transición Abanico - Llanura	Sal2, Sal1	H. Garcés Confenalco Villa del Sur Aguas del Sur Meléndez
8	8a. Llanura aluvial	Sal1, Sal4	Floralia PTAR P. Mallarino Decepaz El Pilar II, P. Vallado Navarro
9	9. Cauces activos y terrazas	Sal7	
10	10. Depósitos Antrópicos	Sfe, Sac, Sam	

El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 8.4 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales son bajos entre 0.2 – 0.3 seg y presenta un perfil de meteorización aproximadamente de 10 m.



836

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y GM, donde cerca del 70% de las muestras corresponden a suelos limosos con un promedio de 30% de grava y 25 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 15 y 45%, con un valor representativo del 20%. El límite líquido presenta una distribución normal, entre 50 y 80% con valores promedio de 60%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 30 y 60% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 40% con un valor promedio de 20%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.90 y 1.44 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.6 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución asimétrica a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 25 golpes/pie, mostrando que cerca del 25% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie (presentan rechazo).

### 6.3.2 Zona 1b. Roca y material intermedio sedimentario

Esta zona está conformada por rocas sedimentarias de la Formación Guachinte, consistentes en intercalaciones de areniscas amarillas y pardo-rojizas, de grano fino a grueso, limolitas y arcillolitas rosadas, areniscas conglomeráticas, conglomerados y algunos niveles de carbón.

Los conglomerados se disponen en paquetes de pocos metros de espesor, y son compactos y muy duros, por lo cual se encuentran asociados con salientes topográficas muy resistentes a la erosión. Este tipo de roca es la más dura dentro de esta unidad, pero es menos resistente que las rocas volcánicas frescas.

Los paquetes de areniscas son los más frecuentes en esta unidad y fluctúan entre pocos decímetros y varios metros de espesor; se presentan en formas masiva o finamente laminada, muy compactas, de color predominante amarillo, con variaciones entre gris y rosado. Las limolitas varían entre pocos centímetros y varios metros de espesor; son duras y compactas, aunque no tanto como las areniscas y presentan colores moteados rosados y habanos. Las arcillolitas de color rosado y violeta, alcanzan espesores decimétricos hasta máximo un metro; generalmente presentan fracturamiento laminar y denso que las hace altamente erosionables y disgregables con la mano (físiles). Los niveles de carbón oscilan entre pocos decímetros a varios metros de espesor. Asociados a estos niveles se presentan fenómenos de subsidencia de los terrenos, debido a las antiguas labores de minería subterránea realizadas en estas zonas.

El material intermedio derivado de la Formación Guachinte es de color amarillo y crema, intensamente fracturado, con meteorización moderada a alta, fácilmente excavable con el martillo, se estima que su espesor puede ser mayor a los 5 metros.

Esta unidad está asociada a la Formación Guachinte y se encuentra en el flanco oriental del Cerro de las Tres Cruces, en la parte baja del flanco oriental del Cerro Cristo Rey, en los barrios Menga, Santa Mónica, Fátima, Normandía, Mortiñal, San Francisco, Siloé, El Cortijo, Los Chorros, La Morelia, barrios Cristales y San Fernando viejo.

El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 6.6 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales son bajos entre 0.2 – 0.3 seg y presenta un perfil de meteorización aproximadamente de 5 m.



837

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por CL, MH y SC, donde cerca del 50% de las muestras corresponden a suelos Arcillo limosos con un promedio de 15% de grava y 40 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 10 y 40%, con un valor representativo del 20%. El límite líquido presenta una distribución sesgada a la izquierda, entre 25 y 80% con un valor promedio de 45%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 15 y 50% con valores representativos del 30%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 50% con un valor promedio de 18%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.95 y 1.55 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.5 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución asimétrica a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 31 golpes/pie, mostrando que cerca del 40% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.3 Zona 2a. Flujo Terrón Colorado

Esta zona esta conformada por una secuencia de materiales depositados en un ambiente fluvio-torrencial, con episodios volcánicos, donde se presentan intercalaciones horizontales de niveles tobáceos y flujos clastosoportados, formados por fragmentos de rocas ígneas básicas (predominantemente diabasas y gabros) que varían en tamaño desde pocos centímetros hasta los 80 centímetros, embebidos en una matriz areno-limosa parda. Los niveles de tobas varían de espesor desde unos pocos decímetros hasta 1,50 metros y son de color gris claro.

Sobre estos depósitos se encuentra ubicada la mayor parte del barrio Terrón Colorado, así como los barrios Bellavista, Miraflores, San Antonio y en el centro de Cali en cercanías a la iglesia La Merced y la Plaza Caicedo, aproximadamente hasta la Calle 15.

El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 4.2 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales son bajos entre 0.4 – 0.5 seg y presenta un espesor aproximado de 1.0 km hacia la parte del centro de Cali.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH, ML y CH, donde cerca del 50% de las muestras corresponden a suelos limo arcillosos con un promedio de 19% de grava y 29 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 20 y 50%, con un valor representativo del 30%. El límite líquido presenta una distribución normal entre 30 y 90% con un valor promedio de 55%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 20 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 50% con un valor promedio de 22%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.85 y 1.35 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 3.1 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución asimétrica a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 31 golpes/pie, mostrando que cerca del 30% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.



8/19

#### 6.3.4 Zona 2b. Flujo Alto Nápoles

Esta zona esta conformada por depósitos de origen fluviotorrencial conformados por bloques, cantos y gravas, de formas subredondeadas a subangulares, compuestos por diabasas, gabros y areniscas esporádicas, altamente meteorizadas, embebidas dentro de una matriz de arena, limo y arcilla de color pardo a rojizo. Son predominantemente matrizsoportados y medianamente compactos. En esta zona se localizó la perforación realizada en los tanques de agua potable en Nápoles.

Estos suelos conforman la mayor parte de los terrenos donde se localizan los barrios de Nápoles, Los Chorros, El Jordán y el Batallón Pichincha. El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 2.6 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales están entre 0.25 – 0.3 seg y presenta un espesor menor de de 600 m hacia la zona del Batallón Pichincha.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH, donde cerca del 10% de las muestras corresponden a suelos limo arcillosos con un promedio de 11% de grava y 35 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 30 y 60%, con un valor representativo del 40%. El límite líquido presenta una distribución sesgada a la derecha, entre 50 y 90% con un valor promedio de 72%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 30 y 60% con valores representativos del 50%. Los índices de plasticidad poseen una distribución normal entre 20 y 50% con un valor promedio de 30%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.8 y 1.2 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.7 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 16 golpes/pie, mostrando que menos del 2% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

#### 6.3.5 Zona 2c. Flujo Cañas Gordas

Esta zona incluye los depósitos de la Formación Jamundí, genéticamente de origen fluvial de baja energía, compuestos por niveles horizontales a sub-horizontales de limos arenosos y arcilla laterítica de color rojo, con esporádicos niveles de flujos torrenciales intercalados, de poco espesor. Se aprecian además, niveles de arcillas grises, compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición, tal como se observa en el barrio Ciudad Jardín, donde se observan taludes de hasta 10 metros de altura.

En general estos materiales son ligeramente compactos y presentan buena estabilidad en laderas de pendientes suaves. Desarrollan una morfología similar a la de los abanicos aluviales, aunque tienen una disección más profunda.

En esta unidad se localizó la perforación de Valle de Lili, la cual se caracterizó por la presencia de estratos limosos de consistencia dura de color ocre y amarillo hasta los 20 m de profundidad, suprayaciendo a un flujo posiblemente volcánico de consistencia muy dura, que geotécnicamente se podría considerar como una roca blanda. Estos suelos conforman la mayor parte de los terrenos localizados sobre la margen izquierda de la quebrada Cañas Gordas y los barrios Ciudad Jardín y La Riverita.



El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 3.5 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales están entre 0.25 – 0.3 seg y presenta un espesor menor de de 800 m hacia la zona del Ciudad Jardín.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH, donde cerca del 5% de las muestras corresponden a suelos limosos con un promedio de 15% de grava y 38 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 30 y 60%, con un valor representativo del 40%. El límite líquido varía entre 60 y 110% con un valor promedio de 79%. El límite plástico posee una distribución normal entre el 40 y 70% con valores representativos del 55%. Los índices de plasticidad poseen una distribución normal entre 20 y 50% con un valor promedio de 29%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.83 y 1.28 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 4.6 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución normal con un pico en los 20 golpes/pie y un promedio de 25 golpes/pie, mostrando que cerca del 10% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.6 Zona 3. Suelo Residual

Los suelos residuales forman una cobertura superficial de espesor no determinado, pero por lo observado en varios cortes viales, su espesor puede ser mayor a 20 metros en suelos de origen volcánico y hasta 4 metros en suelos de origen sedimentario. Dichos materiales se presentan principalmente en zonas ligeramente inclinadas y en pendientes bajas a moderadas; se encuentran mejor desarrollados en las rocas volcánicas básicas y en rocas clásticas finas.

Esta unidad presenta varios niveles claramente diferenciables, así: El horizonte superior A es de color amarillo por la pérdida de hierro, con textura arenosa-limosa, fácilmente lavado por procesos erosivos. El horizonte B presenta colores rojizos y marrones, texturas arcillo-limosas, limo-arcillosas, y estructura granular. El horizonte C tiene colores variables entre amarillos y rojos con manchas negras. Su textura es principalmente areno-limosa, conservando la estructura de la roca original. Visualmente tiene apariencia de roca, pero al contacto con la mano es bastante frágil y deleznable. A veces contiene bloques rocosos de hasta 2 ó 3 metros de diámetro, producto de la meteorización diferencial o esferoidal que caracteriza a estos materiales.

El espesor de esta unidad es muy variable, ya que depende del grado de fracturamiento de la roca original, de la madurez del modelado geomorfológico y de la pendiente de la ladera, entre otros factores. Esta unidad ha sido cartografiada en la mayor parte de la zona alta del flanco oriental del Cerro Cristo Rey y en casi toda la cuenca del río Cañaveralejo, donde puede llegar a alcanzar aproximadamente los 20 m de espesor.

El área aproximada que se encuentra cartografiada de esta zona es de 7.1 Km<sup>2</sup> y los periodos fundamentales están entre 0.25 – 0.4 seg. Esta zona desafortunadamente carece de información geotécnica por dos razones principales: por sus características especiales hace que su muestreo sea difícil, y porque se trata de una zona rural la cual carece de estudios geotécnicos.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y SM, donde cerca del 50% de las muestras corresponden a suelos



limo arenosos con un promedio de 19% de grava y 32 % de arena. La humedad natural varía entre 20 y 60%, con un valor representativo del 35%. El límite líquido varía entre 40 y 100% con un valor promedio de 64%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 60% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 20 y 50% con un valor promedio de 25%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.8 y 1.15 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución asimétrica con un pico en los 5 golpes/pie y un promedio de 19 golpes/pie, mostrando que cerca del 10% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

#### 6.3.7 Zona 4. Suelo Coluvial

En la zona de estudio estos depósitos se encuentran asociados principalmente a las rocas sedimentarias de la Formación Guachinte, lo cual puede ser explicado por la estratificación, fragilidad y fracturamiento las cuales desarrollan superficies de debilidad que son comunes en esta formación y participan de forma importante en la inestabilidad de las laderas.

Uno de los coluviones de mayor extensión se localiza en la parte baja de la vertiente oriental del Cerro de las Tres Cruces, a lo largo de la Avenida Circunvalar de los cerros entre el río Cali y la parte alta del barrio Santa Mónica, el cual se desarrolló como un "talus" sobre el cambio de pendiente entre la zona montañosa y la parte semiplana. Se caracteriza por ser clastosoportado, compacto y estar formado por fragmentos angulares, principalmente de arenisca, que varían de tamaño desde unos pocos centímetros hasta varios metros de diámetro, embebidos en matriz limo-arenosa.

En la zona de Normandía, en la parte baja de la quebrada Buenvivir o Ermita, se presenta un coluvión asociado con un antiguo deslizamiento, dentro del cual se han presentado otros procesos de remoción en masa menores. El depósito es clastosoportado y poco compacto, conformado por fragmentos de arenisca, arcillolitas y lodolitas de tamaños variables entre pocos centímetros y varios metros (predominando los primeros), con matriz limo-arenosa.

A lo largo de la vía Circunvalar, en el tramo Cristales – La Nave, se cartografiaron pequeños coluviones relacionados con las rocas sedimentarias de la Formación Guachinte. Hacia el barrio Los Chorros, en el suroccidente de Cali, también se identificaron varios coluviones, que se caracterizan por presentar bloques de gran tamaño (de 2 a 3 metros de diámetro en promedio) de areniscas conglomeráticas y conglomerados embebidos en matriz limo-arenosa.

Aunque son menos frecuentes en la zona de estudio, también se cartografiaron algunos depósitos coluviales asociados con la Formación Volcánica, en la cuenca de la quebrada Chipichape y al oriente del cerro Cristo Rey. El área total que se encuentra cartografiada de estos coluviones es de 1.6 Km<sup>2</sup>.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por CL, MH y CH, donde cerca del 50% de las muestras corresponden a suelos Arcillo arenosos con un promedio de 16% de grava y 35 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 10 y 50%, con un valor representativo del 22%. El límite líquido varía entre 25 y 90% con un valor promedio de 51%. El límite plástico se sitúa entre el 10 y



811

55% con valores representativos del 30%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 50% con un valor promedio de 23%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.9 y 1.5 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.6 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución asimétrica con un pico en los 30 golpes/pie y un promedio de 30 golpes/pie, mostrando que cerca del 35% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

A manera de comparación en la **Figura 6.11** se presenta la Carta de Plasticidad y la variación del número de golpes N del SPT para las Zonas Geotécnicas de Cerros (Zona 1), Flujos (Zona 2), de Suelos Residuales (Zona 3) y Colusiones (Zona 4).

### 6.3.8 Zona 5. Depósito de Piedemonte

Esta zona esta conformada por los abanicos de las quebradas que se encuentran entre los barrios Cristales hasta Meléndez, cuya característica común es que sus cuencas son pequeñas y están conformadas por rocas sedimentarias, lo cual infiere que los depósitos de piedemonte formados guarden cierta similitud. Aunque es claro que la perforación ubicada en el Velódromo corresponde a la cuenca del Cañaveralejo su perfil muestra una secuencia de materiales predominantemente limosos con intercalaciones de capas arcillosas, sobreconsolidado hasta los 25 m de profundidad aproximadamente, el cual puede representar claramente a esta zona.

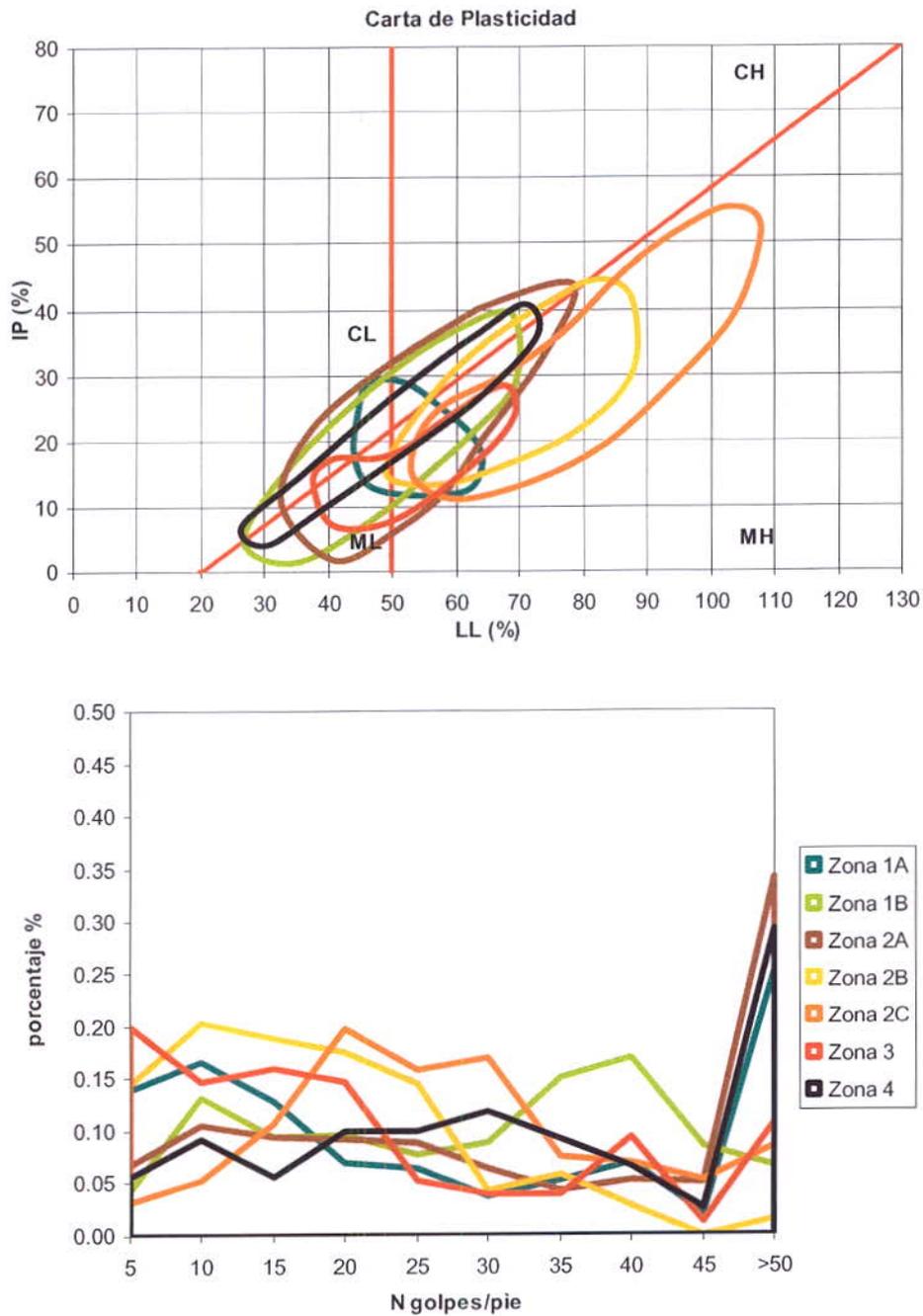
Esta zona comprende los Barrios San Fernando viejo, Santa Isabel, El Lido, Cuarto de Lengua, Puente Palma, Nuevo Refugio, Caldas, y Belisario Caicedo entre otros. El área aproximada de esta zona es de 4.6 Km<sup>2</sup>, los periodos fundamentales están entre 0.6 – 1.20 seg con un valor representativo de 0.95 segundos. Presenta un espesor aproximado de 300 m al terciario y 1.0 km al basamento hacia la zona del Velódromo.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH y CH superficialmente, donde cerca del 15% de las muestras corresponden a suelos limo arenosos con un promedio de 15% de grava y 33 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 20 y 50%, con un valor representativo del 37%. El límite líquido varía entre 40 y 100% con un valor promedio de 67%. El límite plástico se sitúa entre el 25 y 55% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución normal entre 10 y 60% con un valor promedio de 31%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.85 y 1.3 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.3 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 18 golpes/pie, mostrando que cerca del 8% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.9 Zona 6a. Abanico de Menga y de El Bosque

Los abanicos de las quebradas Menga y El Bosque son los de menor extensión y están conformados principalmente por materiales provenientes de rocas sedimentarias y volcánicas que están presentes en las cuencas tributarias. El perfil encontrado en el Parque del Amor se compone de la secuencia de capas de materiales predominantemente arcillosos y limosos cuya consistencia va aumentando en profundidad. A los 50 metros de profundidad se encuentran estratos de limo verdoso muy duro con intercalaciones de capas orgánicas. Los

materiales arcillosos presentan un potencial de expansión considerable y los materiales se encuentran sobreconsolidados hasta los 30 m.



**Figura 6.11.** Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de los cerros



Los principales Barrios que se encuentran en esta zona son: La campiña, La Flora, Vipasa, Menga, El bosque y Chipichape. El área aproximada de esta zona es de 3.9 Km<sup>2</sup>, con periodos fundamentales entre 1.0 – 1.5 seg con un valor promedio de 1.25 seg. Presenta un espesor aproximado de 500 m al terciario y 1.0 km al basamento hacia la zona de la Calle 70 con Avenida 3 Norte.

Se compone esta zona principalmente por materiales CH y MH superficialmente, donde cerca del 30% de las muestras corresponden a suelos arcillo arenosos con un promedio de 16% de grava y 32 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 15 y 55%, con un valor representativo del 30%. El límite líquido varía entre 40 y 100% con un valor promedio de 65%. El límite plástico se sitúa entre el 20 y 50% con valores representativos del 35%. Los índices de plasticidad poseen una distribución sesgada a la izquierda entre 10 y 70% con un valor promedio de 35%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.86 y 1.4 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 3.0 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 20 golpes/pie, mostrando que cerca del 9% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

#### 6.3.10 Zona 6b. Abanico Medio de Cali

Esta zona se caracteriza por la presencia de una capa superficial de arcillas limosas, que en cercanía del río Cali no es mayor a 5 m y a medida que nos alejamos del cauce actual puede llegar a tener un espesor entre 10 y 15 m. Este estrato suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos de varios metros de espesor compuesto por grandes cantos y bloques, en su mayoría subredondeados, con capas de arcillas de 10 m de espesor en promedio.

Los principales barrios que se encuentran en esta zona son: Granada, Versalles, San Nicolás, La Merced, Barrio Obrero, San Pascual, Bretaña y Alameda entre otros. El área aproximada de esta zona es de 5.3 Km<sup>2</sup>, con periodos fundamentales entre 1.0 – 1.3 seg y un valor promedio de 1.1 seg. Presenta un espesor aproximado de 40 m al terciario y 1.2 km al basamento hacia la zona del Colegio Camacho.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente suprayaciendo GM y SM, cerca del 40% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 32% de grava y 30 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 10 y 50%, con un valor representativo del 30%. El límite líquido varía entre 40 y 90% con un valor promedio de 60%. El límite plástico se sitúa entre el 20 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución normal entre 10 y 60% con un valor promedio de 27%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.86 y 1.37 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.1 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 27 golpes/pie, mostrando que cerca del 40% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.



84

### 6.3.11 Zona 6c. Abanico Distal de Cali

Esta zona se caracteriza por la presencia de una capa superficial de arcillas limosas con un espesor entre 10 y 15 m, que suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos de varios metros de espesor compuesto por grandes cantos y bloques, en su mayoría subredondeados, con capas de arcillas de 10 m de espesor en promedio. A partir de los 30 a 35 m de profundidad la perforación en el Vivero encontró materiales finos que tal vez se pueden llegar a correlacionar con depósitos antiguos de llanura aluvial y en el INEM se detectaron claramente las arenas grises de la llanura aluvial.

Los barrios La Merced, Prados del Norte, Santander, Salomia, La Base, Las Ameritas, Las Acacias, Aranjuez y Simón Bolívar se sitúan en esta zona, cuya área aproximada es de 15.7 Km<sup>2</sup>. Presenta periodos fundamentales entre 1.4 – 2.0 seg con un valor promedio de 1.7 seg, con un espesor aproximado de 600 m al terciario y 1.7 km al basamento hacia la zona del Colegio INEM.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente suprayaciendo GM y SM, cerca del 25% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 34% de grava y 32 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 10 y 50%, con un valor representativo del 32%. El límite líquido varía entre 40 y 100% con un valor promedio de 65%. El límite plástico se sitúa entre el 25 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad poseen una distribución un poco sesgada entre 10 y 60% con un valor promedio de 30%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.84 y 1.3 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.4 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 25 golpes/pie, mostrando que cerca del 20% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.12 Zona 6d. Abanico de Cañaveralejo

La zona que comprende los depósitos del río Cañaveralejo tienen la particularidad que la cuenca aporta materiales finos de origen volcánico principalmente. Además, la cuenca se caracteriza por tener una energía de arrastre relativamente baja en comparación con las otras cuencas. En general los materiales de esta unidad se caracterizan por la presencia predominante de materiales arcillosos y limosos de varios metros de espesor con intercalaciones de capas de material orgánico de hasta un metro de espesor, esporádicamente se encuentran lentes de arena fina y algunas gravas, pero en general el perfil hasta los cien metros de profundidad se caracteriza por la secuencia de varios eventos de sedimentación de materiales finos. Por la secuencia de los materiales encontrados se puede deducir que el periodo de sedimentación entre cada evento es considerable debido a que se alcanzó a la formación de capas de materiales orgánicos compuestos principalmente de madera y hojas consolidadas. Los materiales superficiales presentan altos esfuerzos de preconsolidación hasta los 40 m de profundidad.

El área aproximada de esta zona es de 7.0 Km<sup>2</sup>, y cubre los barrios: El Cedro, San Fernando, Colseguros, Tequendama, Los Cambujos, Panamericano, Primero de Mayo y Los Fundadores. Los periodos fundamentales están entre 1.5 – 2.0 seg con un promedio de 1.8



seg. Presenta un espesor aproximado de 600 m al terciario y 1.2 km al basamento hacia la zona del Centro comercial Palmetto Plaza.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente, donde cerca del 12% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 16% de grava y 31 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 20 y 60%, con un valor representativo del 41%. El límite líquido varía entre 40 y 110% con un valor promedio de 74%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad se distribuye entre 20 y 70% con un valor promedio de 37%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.79 y 1.22 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.8 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 16 golpes/pie, mostrando que menos del 5% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

#### **6.3.13 Zona 6e. Abanico de Meléndez y Lili**

Esta zona abarca los abanicos de los ríos Meléndez y Lili, caracterizados por la presencia de una capa superficial de materiales limosos de consistencia dura de unos 10 m de espesor suprayaciendo a estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas de formas angulares a subredondeadas, en matriz areno-arcillosa con intercalaciones de materiales finos predominantemente arcillas duras. Las perforaciones en la parte media del abanico hicieron contacto claro con la llanura aluvial a los 40 m de profundidad.

El área aproximada de esta zona es de 14.3 Km<sup>2</sup>, donde se encuentran los barrios: Alférez Real, Ciudad Capri, Las Quintas de Don Simón, El Limonar, El Ingenio, Univalle y parte de Ciudad Jardín. Los periodos fundamentales están entre 0.5 – 1.3 seg con un promedio de 1.0 seg, presentando un espesor aproximado entre 100 y 200 m al terciario y de 600 m al basamento.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente, donde cerca del 18% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 24% de grava y 32 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 20 y 60%, con un valor representativo del 38%. El límite líquido varía entre 40 y 90% con un valor promedio de 66%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad se distribuyen entre 15 y 55% con un valor promedio de 27%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.81 y 1.23 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 21 golpes/pie, mostrando que menos del 10% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

#### **6.3.14 Zona 6f. Abanico de Pance**

Este abanico se caracteriza por la presencia de una pequeña capa de materiales limosos no mayor a 4 m de espesor suprayaciendo a un estrato muy duro compuestos de gravas y cantos medianamente compactos, matriz soportados. Los cuales por sus características son difíciles de perforar, razón por la cual las exploraciones no pudieron superar los 10 m de profundidad.



046

Esta zona se extiende al sur de Cali donde se localizan las Parcelaciones como los 21, Piedra Grande y gran parte de los sectores de expansión de la ciudad. El área aproximada de esta zona es de 26.1 Km<sup>2</sup>, con periodos fundamentales entre 0.5 – 1.0 seg con un promedio de 0.8 seg. Presenta un espesor aproximado de 200 m al terciario y 700 m al basamento en la parte media del abanico.

Se compone esta zona principalmente por materiales MH superficialmente que suprayacen GM, donde cerca del 35% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 23% de grava y 25 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 20 y 60%, con un valor representativo del 35%. El límite líquido varía entre 40 y 90% con un valor promedio de 62%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 60% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad se distribuyen entre 20 y 40% con un valor promedio de 22%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.81 y 1.27 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución poco simétrica con un pico en los 20 golpes/pie y un promedio de 28 golpes/pie, mostrando que cerca del 20% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

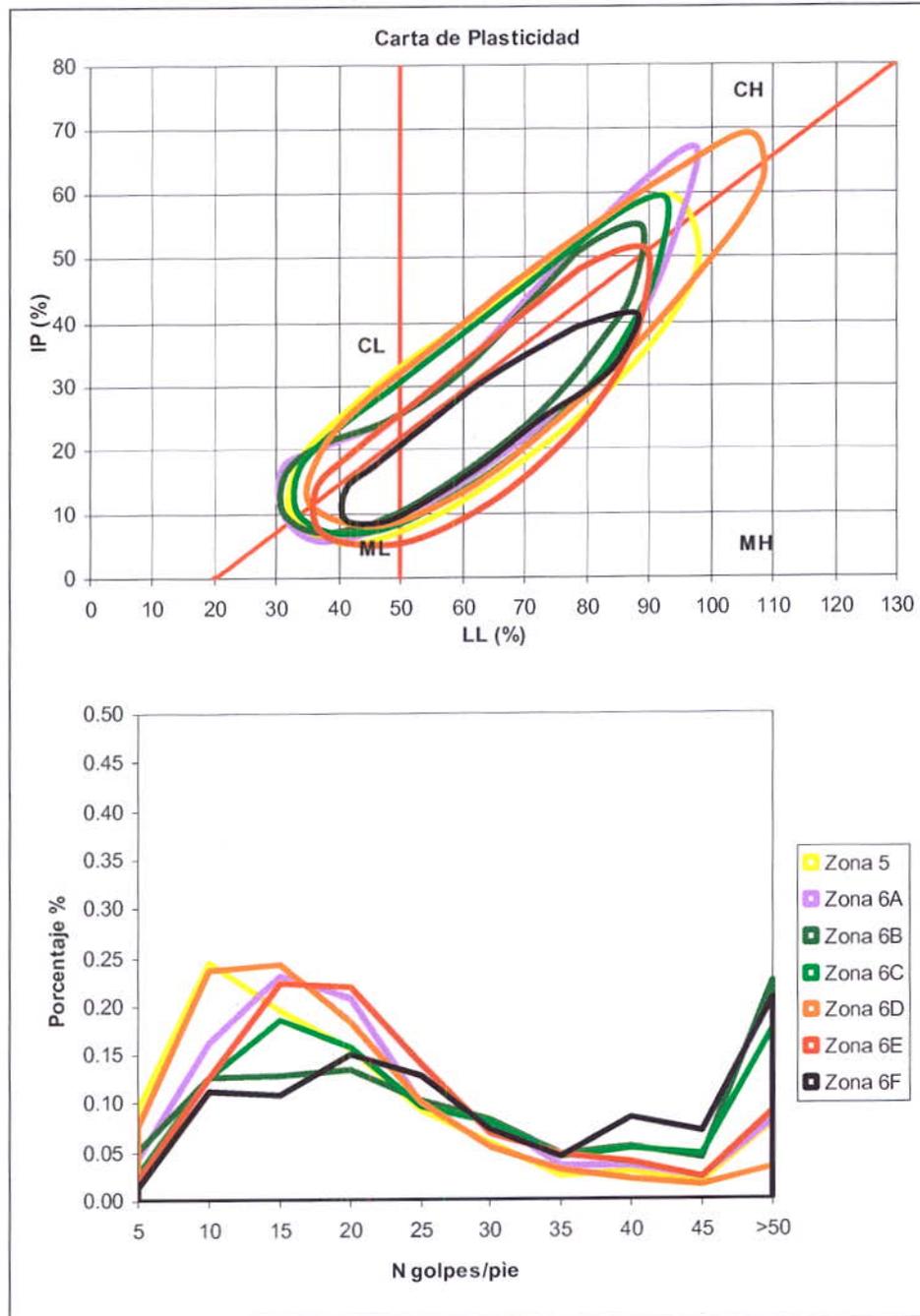
A manera de comparación, la **Figura 6.12** presenta la Carta de Plasticidad y la variación del número de golpes N (SPT) para las zonas de Piedemonte (Zona 5) y de Abanicos (Zona 6).

### 6.3.15 Zona 7. Transición Abanicos - Llanura

Debido a la coalescencia entre los abanicos aluviales y la llanura aluvial es importante establecer una zona de transición entre estas dos unidades. Lo cual se observa en los perfiles con presencia de intercalaciones de materiales gruesos y finos provenientes de los abanicos, con materiales arenosos de color gris propios de la llanura aluvial. El criterio para establecer esta zona se basa en determinar la profundidad desde donde comienzan los materiales de la llanura aluvial, de modo que; si empiezan a aparecer a profundidades entre 15 y 20 m el perfil se encuentra en una zona de transición entre los abanicos y la llanura aluvial.

En general esta zona se caracteriza por la presencia superficial de materiales finos, con altos esfuerzos de preconsolidación, compuestos por arcillas y limos suprayaciendo a estratos gravosos con matrices arcillosas predominantemente, que se extienden entre los 15 y 20 m de profundidad, desde donde empieza a aparecer el perfil típico de la llanura aluvial que se mezcla con los materiales del abanico. Al igual que en la llanura aluvial se encontraron estratos de limo verdoso muy duro con intercalaciones de material orgánico cerca de los 50 m de profundidad.

El área aproximada de esta zona es de 22.6 Km<sup>2</sup>, y abarca de sur a norte una franja que atraviesa los barrios: El Caney, Brisas del Limonar, Villa del Sur, El Jardín, La Fortaleza, Eduardo Santos, El Trébol, San Marino y Los Guayacanes. Los periodos fundamentales están entre 1.4 – 2.0 seg con un promedio de 1.75 seg. Presenta una fuerte variación en su espesor que va desde los 600 m hasta los 1000 m al terciario y desde los 1.2 km a los 2.0 km al basamento.



**Figura 6.12.** Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de abanicos.



848

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH suprayaciendo a SM, donde cerca del 13% de las muestras corresponden a suelos arenosos con un promedio de 24% de grava y 42% de arena. La humedad natural varía entre 20 y 60%, con un valor representativo del 38%. El límite líquido varía entre 40 y 110% con un valor promedio de 71%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad varían entre 10 y 70% con un valor promedio de 34%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.82 y 1.23 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.1 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 19 golpes/pie, mostrando que cerca del 5% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.16 Zona 8a. Llanura aluvial

Esta unidad se localiza al extremo oriental de la zona estudiada y está conformada por depósitos antiguos del río Cauca, dejados a lo largo de la evolución y divagación del cauce, se caracteriza por la presencia de una capa de materiales limo arcillosos de un espesor entre 5 y 10 m sobreconsolidados, suprayaciendo al depósito de arenas finas normalmente consolidado de compacidad suelta a medianamente compacta, que en profundidad va aumentando su tamaño hasta gravas finas y medianamente compactas, en algunas exploraciones hacia los 50 m de profundidad se llegó a encontrar estratos de limo verdoso de consistencia muy dura mezclados con capas de material orgánico.

Esta zona se caracteriza por presentar un relieve suave y deprimido, con redes de drenaje que reflejan la posición de líneas antiguas de drenaje. Sobre esta zona se localiza parte de Navarro y algunos sectores de Aguablanca como los barrios Unión de Vivienda Popular Ciudad Córdoba, Laureano Gómez, Antonio Nariño, Alirio Mora Beltrán, Comuneros (Laguna de Regulación), Decepaz, Pizamos, Alfonso López, Petecuy, San Luis, Alcázares y Floralia.

El área aproximada de esta zona es de 60.7 Km<sup>2</sup>, siendo esta la zona más amplia, cuyas características descritas hace que se deba estudiar con especial cuidado el posible fenómeno de licuación de las arenas y el corrimiento lateral en las márgenes del río Cauca. Los periodos fundamentales están entre 1.4 – 1.75 seg, y en sectores como Navarro y al Norte de Cali puede ser de hasta 2.0 seg con un valor promedio de 1.75 seg. El espesor aproximado del depósito esta entre 800 y 1400 m al terciario y entre 1.6 a 2.2 km al basamento.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH suprayaciendo a SM, donde cerca del 30% de las muestras corresponden a suelos arenosos con un promedio de 7% de grava y 56% de arena. La humedad natural varía entre 20 y 60%, con un valor representativo del 33%. El límite líquido varía entre 30 y 110% con un valor promedio de 63%. El límite plástico se sitúa entre el 10 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad varían entre 10 y 70% con un valor promedio de 30%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.82 y 1.26 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 18 golpes/pie, mostrando que cerca del 8% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.



049

### 6.3.17 Zona 8b. Relleno de Cauce y Zonas Desecadas

Corresponde a zonas de antiguos pantanos, conformados por sedimentos finos, desecados artificial o naturalmente. Generalmente se encuentran dentro de la llanura aluvial o alrededor de las zonas de pantanos.

Sobre esta zona se ubican los barrios Ciudad Córdoba, Antonio Nariño, El Diamante, La Gran Colombia, El Trébol, Villa Colombia, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Unión de Vivienda Popular y República de Israel, entre otros. El área total de estas zonas es de 3.6 Km<sup>2</sup>.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH suprayaciendo a SM, donde cerca del 15% de las muestras corresponden a suelos arenosos con un promedio de 14% de grava y 40% de arena. La humedad natural varía entre 20 y 70%, con un valor representativo del 40%. El límite líquido varía entre 40 y 120% con un valor promedio de 79%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 60% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad varían entre 10 y 90% con un valor promedio de 42%. Según los anteriores parámetros índices, se nota que estos materiales pueden presentar un potencial expansivo considerable. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.79 y 1.22 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.78 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 15 golpes/pie y un promedio de 19 golpes/pie, mostrando que cerca del 7% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.18 Zona 8c. Cauce antiguo

Correspondientes a lechos de ríos, arroyos y bancos de arena que se desarrollan en el lado interno de la curva de un meandro, que por procesos naturales de dinámica y divagación del cauce, o en ocasiones por acción del hombre, con el objeto de aprovechar la mayor extensión de la planicie aluvial para fines agropecuarios, son aislados o abandonados. En algunos sectores estos cauces abandonados se encuentran cubiertos por agua y en otros, rellenos por materiales predominantemente arcillosos o en zonas como el Distrito de Agua Blanca estos han sido rellenos con materiales no aptos.

Se presentan principalmente en Navarro y a todo lo largo del antiguo cauce del río Cauca, conocido por sectores como Caño El Estero, Cascajal y Cauquita, ubicados entre La Playa, El Hormiguero y Puerto Mallarino con un área total de 5.4 Km<sup>2</sup>.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por SM y MH, donde cerca del 30% de las muestras corresponden a suelos arenosos con un promedio de 1% de grava y 67% de arena. La humedad natural varía entre 20 y 60%, con un valor representativo del 31%. El límite líquido varía entre 40 y 110% con un valor promedio de 60%. El límite plástico se sitúa entre el 30 y 40% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad varían entre 10 y 60% con un valor promedio de 29%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.81 y 1.36 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 3.7 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una



distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 15 golpes/pie, mostrando que menos del 2% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

### 6.3.19 Zona 9. Cauces activos y terrazas

Son los depósitos aluviales recientes y actuales, sueltos, acumulados en las llanuras y márgenes de los ríos y arroyos, encontrados a manera de barras, playas y terrazas, con tamaño de grano arena, grava, cantos y bloques, cuya composición corresponde a rocas ígneas y sedimentarias, provenientes de la cordillera occidental.

Algunas corrientes principales entre las que sobresalen el río Pance, Meléndez, Lili, Cañaveralejo, Cali, Aguacatal y Menga, que cortan los abanicos, depositan este tipo de material. Esto también se observa en algunas corrientes que disectan la llanura aluvial del río Cauca.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH suprayaciendo a SM y GM, donde cerca del 40% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 27% de grava y 38% de arena. La humedad natural varía entre 10 y 60%, con un valor representativo del 31%. El límite líquido varía entre 30 y 100% con un valor promedio de 59%. El límite plástico se sitúa entre el 10 y 50% con valores representativos del 40%. Los índices de plasticidad varían entre 10 y 60% con un valor promedio de 25%. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.82 y 1.29 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.7 kg/cm<sup>2</sup>, de igual forma los valores de N del SPT, poseen una distribución sesgada a la izquierda con un pico en los 10 golpes/pie y un promedio de 23 golpes/pie, mostrando que cerca del 22% de las pruebas tienen más de 50 golpes/pie.

A manera de comparación, en la **Figura 6.13** se presenta la Carta de Plasticidad y la variación del número de golpes N (SPT) para las zonas de Transición (Zona 7), de Llanura aluvial (Zona 8) y de Cauces activos (Zona 9).

### 6.3.20 Zona 10. Depósitos Antrópicos

En esta zona se agruparon las unidades geológicas superficiales que tienen en común la heterogeneidad de sus materiales que la conforman, por lo cual resulta difícil caracterizarlas geotécnicamente. En esta zona clasifican: Flujos de Escombros de la Zona de Menga, Rellenos con Escombros de Construcción, Estériles de Minería y el Basurero de Navarro. El área cartografiada de estos depósitos es inferior a los 0.7 Km<sup>2</sup>. Cabe anotar que paralelo a los estudios geotécnicos se realizó un estudio de los rellenos antrópicos de la ciudad (ver informe No.2.3, Subproyecto de Geología, Proyecto MZSCali, 2005).

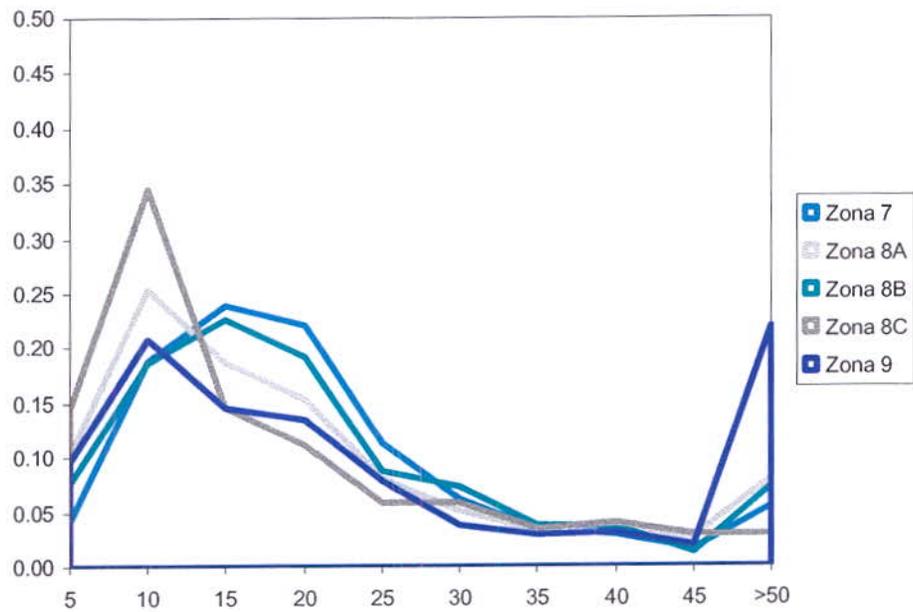
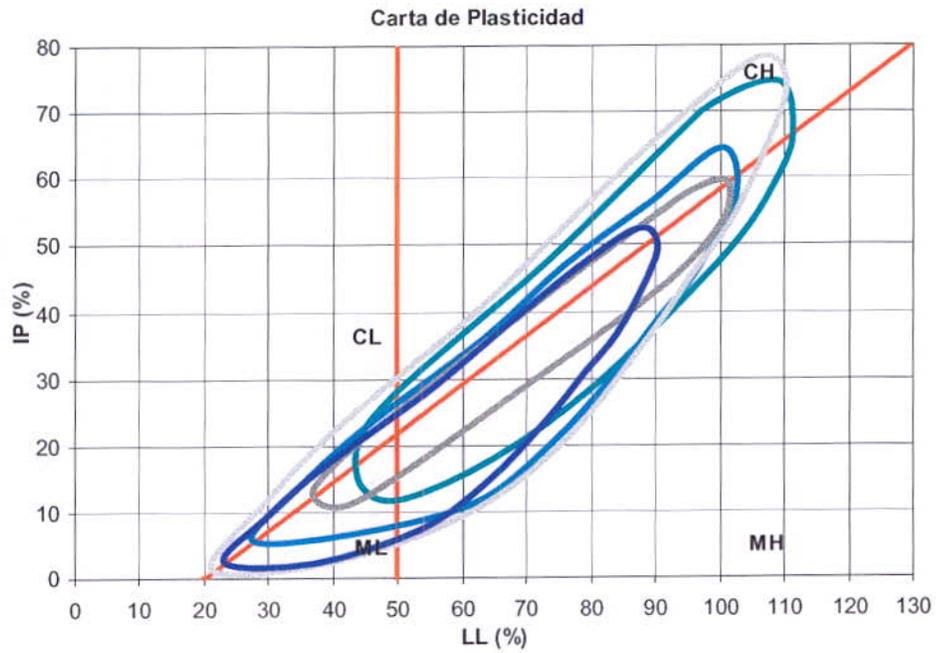


Figura 6.13. Carta de plasticidad y variación del N (SPT) para las Zonas Geotécnicas de Llanura.



---

## CAPITULO 7

---

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Base de Datos Geotécnica (BDG) se entrega en formato digital elaborado en Excel, aclarando que en ella sólo se encuentran los datos tal y cual están reportados en los estudios de suelos recopilados (estratigrafía, resultados de ensayos de laboratorio y de campo, entre otros). En ningún caso se presentan los procesamientos y análisis intermedios realizados con esta información, sin embargo los resultados finales, mapas e interpretaciones se presentan detalladamente en el Capítulo 2 del presente informe. Adicionalmente se entrega un Módulo de Consulta estructurado e implementado en Access.

A pesar de que las exploraciones que conforman la BDG no superan los 10 m de profundidad promedio, lograron cubrir un gran porcentaje del área de la ciudad, constituyéndose en uno de los principales insumos con que se definió la zonificación geotécnica a nivel superficial. Cabe anotar que la mayor parte de los estudios de suelos utilizan la prueba SPT, para el diseño de cimentaciones superficiales y profundas; por ello, hacen uso de las correlaciones desarrolladas en la Florida para arcillas (Schmertmann, 1967), dando la carga última de diseño más no los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos, que son los necesarios para los análisis dinámicos. Los análisis de la BDG infieren dos perfiles geotécnicos típicos, muy acordes con las unidades geológicas superficiales establecidas. El primero está compuesto de materiales finos, arcillas y limos, suprayaciendo a estratos de gravas correspondientes en general a los abanicos aluviales de los ríos Cali, Cañaveralejo, Meléndez, Lili, y Pance. El segundo corresponde a materiales finos, arcillas y limos, suprayaciendo a estratos de arena los cuales se extienden en la llanura aluvial del río Cauca.

La investigación del subsuelo estuvo orientada a obtener propiedades estáticas y dinámicas del subsuelo, a partir de ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas e inalteradas de suelo y pruebas in situ. Con base en esto, la investigación geotécnica en la ciudad de Cali se realizó mediante exploraciones directas e indirectas del subsuelo, que comprendieron la realización de 30 perforaciones mecánicas, 8 ensayos CPTU, 6 pruebas DMT, 8 ensayos CPT y finalmente la ejecución de 18 ensayos de Down Hole. En total se realizaron 1385 metros de perforación mecánica y 357 metros de sondeos con el piezocono sísmico, para un total de 1742 metros de exploración geotécnica y 725 metros de Down Hole.

Los ensayos de laboratorio se enfocaron a la determinación de parámetros geomecánicos para los modelos de análisis, dichos parámetros se obtienen principalmente de ensayos de consolidación, triaxiales estáticos y triaxiales cíclicos. La totalidad de los resultados de los ensayos de laboratorio y de campo correspondientes a las investigaciones geotécnicas ejecutadas en la ciudad, se han incorporado a la BDG con el fin de facilitar el manejo y análisis estadísticos de los mismos.



Se realizaron 30 perfiles geotécnicos que oscilan entre 4 m y 100 m con propiedades índices, geomecánicas y velocidades de onda de corte, los cuales son el insumo principal para realizar los modelos de la respuesta dinámica.

Con base en las exploraciones realizadas se logró agrupar los suelos de comportamientos geomecánicos similares según sus propiedades índice, de compresibilidad y resistencia, en seis clases de arcillas, cinco tipos de limos, cuatro clases de arenas, cuatro clases de gravas y dos tipos de materia orgánica.

Se plantearon nueve secciones geotécnicas en el sentido de la depositación de los materiales provenientes de las cuencas de la cordillera, con lo que se logró visualizar las siguientes zonas: el piedemonte, el ápice, la parte media y distal de los abanicos, hasta llegar a la llanura de inundación del río Cauca, y el sector de interdigitación entre los abanicos y la llanura aluvial. Estas secciones geotécnicas indican a manera general, la posible disposición de grandes paquetes de materiales asociados a eventos geológicos, observándose una mayor densidad de paquetes superficiales debido a la disponibilidad de mayor información, con la cual se pueden inferir con mayor precisión otras capas de materiales. En general, el perfil de depositación se caracteriza por presentar los materiales más gruesos hacia los ápices de los abanicos, mientras que hacia la parte distal de los mismos se encuentran los materiales más finos.

El Mapa de Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica que se presenta en este informe es el resultado de los análisis e integración de información de tres grandes disciplinas en general: geología, geofísica y geotecnia, lo que permitió proponer un modelo de la conformación de los depósitos presentes en la ciudad de Cali. Dicho proceso de análisis se estructuró por coberturas de información, para ello, la información se articuló bajo el Sistema de Información Geográfica utilizado durante el proyecto (ArcGIS by ESRI).

Los límites de las zonas geotécnicas propuestas en el presente no deben tomarse como líneas absolutas que separan dos unidades, puesto que, estos indican una franja que infiere el cambio de una zona a otra. Luego es posible que en cercanía a las fronteras de una determinada zona se encuentren características de la zona contigua.

En las zonas de abanicos aluviales se estima que la profundidad de los limos y arcillas sobreconsolidadas se extiende hasta los 40 metros de profundidad en general, encontrándose materiales superficiales que presentan relaciones de sobreconsolidación de hasta 15, lo cual infiere que los materiales presenten valores altos de resistencia y comportamientos frágiles. Estos abanicos aluviales geotécnicamente se diferencian en cuanto a los espesores y propiedades geomecánicas de sus estratos, por lo que fue necesario subdividirlos en algunos casos, acudiendo a la información geomorfológica, geofísica y geotécnica.

Las zonas de transición y llanura aluvial están conformadas por depósitos antiguos del río Cauca, dejados a lo largo de la evolución y divagación del cauce, se caracteriza por la presencia de una capa de materiales limo arcillosos de un espesor entre 5 y 20 m sobreconsolidados, suprayaciendo al depósito de arenas finas normalmente consolidado de compacidad suelta a medianamente compacta, que en profundidad va aumentando su tamaño hasta gravas finas y medianamente compactas. Estos depósitos arenosos por sus



características de compacidad son susceptibles a sufrir licuación, fenómeno que se aborda mediante análisis y modelos detallados de respuesta sísmica en esta zona.

Se recomienda continuar con la incorporación a la BDG de futuros estudios de suelos que se emprendan en la ciudad, siguiendo la estructura planteada en el presente informe, considerando la confiabilidad de los datos. Con ello se lograría avanzar en el conocimiento de las características geotécnicas locales de la ciudad. Adicionalmente, se plantea, con el ánimo de mejorar el conocimiento del subsuelo, que los estudios de suelos que se realicen para proyectos de gran envergadura (p.e edificios de más de 10 pisos) consideren la opción de ejecutar una exploración profunda con su respectivo ensayo Down Hole (del orden de 50 metros).

Es importante aclarar que tanto la información de las exploraciones como los resultados de los ensayos de laboratorio que se lograron en esta investigación, si bien son un gran avance en el conocimiento geomecánico y dinámico de los depósitos de la ciudad, no reemplazan la realización de estudios de suelos y geotécnicos detallados requeridos para el diseño y construcción de un proyecto en particular.



---

## CAPITULO 8

---

### REFERENCIAS

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistentes NSR98, Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998.

Braha M. Dass (1999). Mecánica de Suelos

INGEOMINAS. (2003). Proyecto de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cali, Informe 5.3 - Respuesta Sísmica en el Sector de Navarro. Subdirección de Amenazas Geológicas, Bogotá.

Kramer S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall. USA.

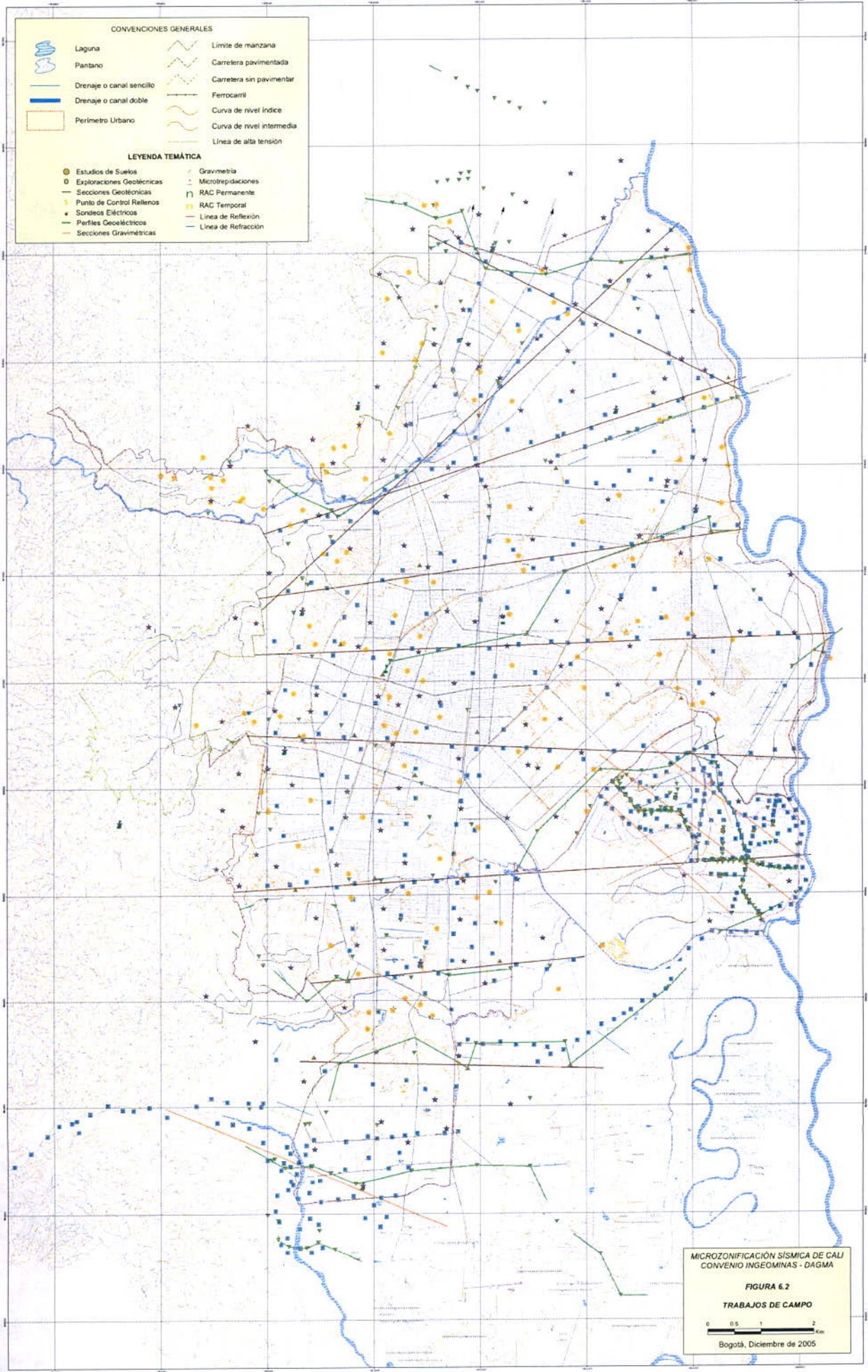
LUNNE, T. and ROBERTSON P.K., 2001. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Span Press.

Ojeda, J. (2003). Elementos conceptuales y metodológicos para la zonificación geotécnica de Cali. Documento Interno Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali. INGEOMINAS, Bogotá.

Villafañe, G. (1996). Algunas experiencias del diseño geotécnico de cimentaciones superficiales. Memorias del 2º Seminario Internacional de Geotecnia. Universidad EAFIT. Medellín.

Villafañe, G., Coronado, C.A., Ríos, J.C. (2000). Cimentaciones en suelos expansivos: práctica local. Memorias del 8º Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá.

YOUD, T.L and IDRIS, I.M, eds., 1997. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.



MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CALI  
CONVENIO INGEOMINAS - DAGMA

FIGURA 6.2  
TRABAJOS DE CAMPO

0 0.5 1 2  
Km

Bogotá, Diciembre de 2005